



TUGAS AKHIR - TF 141581

**ANALISIS KOMPENSATOR AKIBAT *EXTERNAL*
DISTURBANCES PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA
*EXTENDED***

PRISMA ANANDITO
NRP. 2413 100 074

Dosen Pembimbing :
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 141581

***ANALYSIS OF COMPENSATOR CAUSED BY EXTERNAL
DISTURBANCES ON EXTENDED SIGMA CLASS SHIP***

PRISMA ANANDITO
NRP. 2413 100 074

Supervisor :
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

***ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, 2017***

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Prisma Anandito
NRP : 2413100074
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul "ANALISIS KOMPENSATOR AKIBAT *EXTERNAL DISTURBANCES* PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA *EXTENDED*" adalah bebas dari plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 12 Juli 2017
Yang membuat pernyataan,



Prisma Anandito
2413100074

Halaman ini sengaja dikosongkan

TUGAS AKHIR

ANALISIS KOMPENSATOR AKIBAT *EXTERNAL DISTURBANCES* PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA *EXTENDED*

Oleh :
Prisma Anandito
NRP. 2413 100 074

Surabaya, 11 Februari 2017

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I



Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
NIPN. 196601161989032001

Menyetujui,
Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.
NIPN. 195808071984031001

Mengetahui,
Ketua Jurusan

Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhamad Hatta, S.T., M.St., Ph.D.
NIPN. 19780902 200312 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISIS KOMPENSATOR AKIBAT *EXTERNAL*
DISTURBANCES PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA
*EXTENDED***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

PRISMA ANANDITO

NRP. 2413 100 074

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T (Pembimbing I)
2. Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng. (Pembimbing II)
3. Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST, MT (Penguji I)
4. Ir. Ya'umar, MT (Penguji II)
5. Dr. Ing. Doty Dewi Risanti, ST, MT (Penguji III)

SURABAYA

JULI, 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS KOMPENSATOR AKIBAT EXTERNAL DISTURBANCES PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA EXTENDED

Nama : Prisma Anandito
NRP : 2413 100 074
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. Aulia S. Aisjah, M.T.
2. Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

Abstrak

Kapal perang kelas SIGMA (*Ship Integrated Geometrical Modularity Approach*) *extended* merupakan kapal yang dirancang dan digunakan oleh TNI Angkatan Laut sebagai kapal patroli pada daerah Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE), misi SAR, dan misi anti kapal selam dengan kemampuan propulsi dan berlayar yang melebihi kapal patroli lainnya. Sebagai kapal yang digunakan untuk patroli dan menjalankan berbagai misi, kapal SIGMA *Extended* membutuhkan kemampuan untuk bertahan dalam berbagai macam gangguan terutama gelombang laut dengan ketinggian yang bervariasi. Pada penelitian ini, dilakukan sebuah perancangan dan analisa kompensator terhadap kapal disaat kapal diberikan gangguan dalam berbagai kondisi. Hasil rancangan kompensator menunjukkan bahwa pada *lead compensator* mampu mempertahankan kestabilan dengan *settling time* 37.21 pada *sea-state* 4 hingga 52.40 detik pada *sea-state* 8 dari rancangan yang telah dibuat namun dengan *overshoot* yang masih cukup tinggi bila ingin digunakan sebagai kompensator untuk *rudder*. Hasil lain pada *lag compensator* dan *lead-lag compensator* menunjukkan bahwa sistem tidak cocok dengan peletakan *pole-zero* dengan aturan *lag*.

Kata Kunci: *Lag compensator, Lead compensator, Lead-lag compensator, overshoot, settling time, SIGMA Extended.*

ANALYSIS OF COMPENSATOR CAUSED BY EXTERNAL DISTURBANCES ON EXTENDED SIGMA CLASS SHIP

Name : Prisma Anandito
Student ID : 2413 100 074
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisor : 1. Prof. Dr. Ir. Aulia S. Aisjah, M.T.
2. Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

Abstract

The SIGMA Extended are ships that specifically designed and used by the Navy as a patrol boat in the ZEE area, SAR missions, and anti-submarine missions with a really good propulsion and sailing abilities rather than other patrol ships. SIGMA Extended ship needs to have the ability to withstand a wide range of disturbances especially ocean waves with a variety of heights. In this study, the compensator that designed will be tested with various level of disturbances. The compensator design results show that the lead compensator is able to maintain the stability of the system with settling time of 37.21 at sea-state 4 to 52.40 at sea state 8 but with a high overshoot. The other type of compensator couldn't handle the disturbances because the system isn't compatible with the pole-zero arrangement at the lag rule.

Keywords: Lag compensator, Lead compensator, Lead-lag compensator, overshoot, settling time, SIGMA Extended.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya dapat terselesaikan laporan tugas akhir yang berjudul **ANALISIS KOMPENSATOR AKIBAT *EXTERNAL DISTURBANCES* PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA *EXTENDED***.

Dalam pembuatan laporan tugas akhir ini pun tidak lepas dari bantuan segala pihak. Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu dan kemudahan dalam proses pembuatan tugas akhir penulis.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. dan Bapak Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan banyak sekali ilmu dan arahan dalam pembuatan tugas akhir penulis.
3. Bapak Totok Ruki Biyanto S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Instrumensi yang telah memberikan ilmu dan kemudahan dalam proses pembuatan tugas akhir penulis.
4. Bapak Ir. Heri Joestiono, MT selaku dosen pembimbing penulis yang telah memberikan arahan setiap perwalian.
5. Kedua orang tua (Tony Husein dan Endang Pratiwi) serta kedua adik (Marutti Andriana dan Marizka Harutti). Terima kasih atas segala doa dan harapan yang ditiptkan pada penulis, perhatian, bantuan moril dan materil yang telah diberikan.
6. Seluruh teman Tugas Akhir bidang Rekayasa Instrumentasi, terima kasih untuk semua bantuannya.
7. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu oleh penulis, terima kasih banyak atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidak lepas dari kesalahan, namun penulis berharap dengan dibuatnya laporan tugas akhir ini dapat memberikan wawasan dan manfaat bagi pembacanya, keluarga besar Teknik Fisika dan seluruh civitas akademik ITS ; hingga nantinya dapat berfungsi sebagai referensi di penelitian atau pengerjaan laporan tugas akhir berikutnya

Surabaya, 9 Februari 2017

Penulis.

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR - TF 141581	i
FINAL PROJECT - TF 141581	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vi
LEMBAR PENGESAHAN II	viii
Abstrak	xi
Abstract	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xxi
DAFTAR TABEL	xxv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
BAB II TEORI PENUNJANG	5
2.1 Kompensator.....	5
2.2 Pergerakan Kapal Translasi dan Rotasi	7
2.3 Kapal Perang Kelas SIGMA <i>Extended</i>	9
2.4 Pemodelan Dinamika Kapal SIGMA <i>Extended</i>	13
2.5 Sistem Pengendalian.....	19

2.6 Model Gangguan Pada Kapal	19
2.7 Diagram Nyquist	22
2.8 Diagram Root-Locus	22
2.9 Diagram Bode.....	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Studi Literatur.....	26
3.2 Pengumpulan Spesifikasi Kapal Perang Kelas SIGMA <i>Extended</i>	26
3.3 Pemodelan Kapal Perang Kelas SIGMA <i>Extended</i> dan <i>External Disturbances</i>	27
3.4 Pemodelan Gangguan Kapal Tiap Sea State	31
3.5 Pembuatan Rancangan Simulasi Kompensator	32
3.6 Analisa Hasil Simulasi	35
3.7 Penyusunan Laporan	36
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Analisa Awal pada Sistem Tanpa <i>External Disturbances</i> dan batasan Heading Rudder.....	37
4.11 Lead Compensator Pada Sistem Tanpa External Disturbances dan batasan Heading Rudder	43
4.12 <i>Lag Compensator</i> Pada Sistem Tanpa <i>External Disturbances</i> dan batasan Heading Rudder	46
4.13 <i>Lead - Lag Compensator</i> Pada Sistem Tanpa <i>External</i> <i>Disturbances</i> dan batasan Heading Rudder.....	49
4.2 Analisa Penambahan Kompensator pada Sistem dengan <i>External Disturbances</i>	53
4.2.1 Lead Compensator.....	54
4.2.2 Lag Compensator	58

4.2.3 Lead – Lag Compensator.....	59
4.3 Penerapan Kompensator pada Kondisi <i>Existing</i> PID	61
4.3.1 Kondisi PID <i>Existing</i>	61
4.3.2 Penggunaan Kompensator dengan Pengendali PID	64
4.4 Pembahasan	68
BAB V PENUTUP	71
5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA.....	73
LAMPIRAN	75

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Komponen Gerak pada Kapal (Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1994)	8
Gambar 2.2 Bentuk Diagram Blok Sistem <i>Close Loop</i> (Ogata, 2002).....	19
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Tugas Akhir	25
Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem Pengendalian.....	27
Gambar 3.3 Hasil Respon Uji Open Loop dengan Fungsi <i>Step</i>	30
Gambar 3.4 Arsitektur Kontrol Standar pada SISOTOOL	33
Gambar 3.5 Tampilan Desain Awal Kompensator Tanpa <i>External Disturbances</i> dan Batasan <i>Heading Rudder</i>	34
Gambar 3.6 Tampilan Desain Awal Kompensator Dengan <i>External Disturbances</i> dan Batasan <i>Heading Rudder</i>	34
Gambar 3.7 Blok Diagram <i>Rudder</i> dengan <i>Limitter</i> (Cruz, 2005)	35
Gambar 3.8 Desain Penambahan Kompensator pada Pengendali	35
Gambar 3.9 Kestabilan Hasil Desain pada <i>Root-locus</i> dan <i>Bode</i>	36
Gambar 4.1 Hasil Pembuatan Awal Diagram Root-Locus pada (G) yakni Sistem Tanpa <i>External Disturbances</i>	39
Gambar 4.2 Hasil Pembuatan Awal Diagram Bode pada (G) yakni Sistem Tanpa <i>External Disturbances</i>	40
Gambar 4.3 Aturan yang Dibuat pada <i>Plot Analysis</i> untuk Memunculkan <i>Step/Nyquist</i> dari Masukan R Menuju Keluaran Y	41
Gambar 4.4 Hasil Pembuatan Awal Respon <i>Step</i> (G) pada Sistem Tanpa <i>External Disturbances</i>	42
Gambar 4.5 Penambahan <i>Design Requirement</i> pada Sistem Tanpa <i>External Disturbances</i>	43
Gambar 4.6 Letak <i>Pole</i> dan <i>Zero</i> Uji Kompensator <i>Lead</i> Pertama pada -1, 10	44

Gambar 4.7 Respon <i>Step</i> Uji Kompensator <i>Lead</i> Pertama	45
Gambar 4.8 Respon <i>Step</i> Uji Kompensator <i>Lag</i> Pertama Tanpa <i>External Disturbances</i>	47
Gambar 4.9 Respon Diagram Bode pada Uji Kompensator <i>Lag</i> Pertama.....	48
Gambar 4.10 Respon <i>Step</i> Uji Kompensator <i>Lag</i> Kedua Tanpa <i>External Disturbances</i>	49
Gambar 4.11 Respon <i>Step</i> Uji Kompensator <i>Lead-Lag</i> Pertama	51
Gambar 4.12 Respon <i>Step</i> Uji Kompensator <i>Lead-Lag</i> Kedua ..	52
Gambar 4.13 Letak Kedudukan Akar-Akar pada <i>Lead-Lag Compensator</i> Tanpa <i>External Disturbances</i>	53
Gambar 4.14 Tampilan Rancangan <i>Lead Compensator</i> dengan <i>External Disturbances</i>	54
Gambar 4.15 Hasil Respon <i>Step</i> terhadap Rancangan <i>Lead Compensator</i> dengan Nilai <i>Sea State</i> 4	55
Gambar 4.16 Hasil Respon <i>Step</i> terhadap Rancangan <i>Lead Compensator</i> dengan Nilai <i>Sea State</i> 5	55
Gambar 4.17 Hasil Respon <i>Step</i> terhadap Rancangan <i>Lead Compensator</i> dengan Nilai <i>Sea State</i> 6	56
Gambar 4.18 Hasil Respon <i>Step</i> terhadap Rancangan <i>Lead Compensator</i> dengan Nilai <i>Sea State</i> 7	57
Gambar 4.19 Hasil Respon <i>Step</i> terhadap Rancangan <i>Lead Compensator</i> dengan Nilai <i>Sea State</i> 8	57
Gambar 4.20 Tampilan Rancangan <i>Lag Compensator</i> dengan <i>External Disturbances</i>	58
Gambar 4.21 Hasil Respon <i>Step</i> terhadap Rancangan <i>Lag Compensator</i> dengan Nilai <i>Sea State</i> 4 Uji Pertama	59
Gambar 4.22 Hasil Respon <i>Step</i> terhadap Rancangan <i>Lag Compensator</i> dengan Nilai <i>Sea State</i> 4 Uji Kedua.....	59
Gambar 4.23 Tampilan rancangan lead-lag compensator dengan external disturbances	60
Gambar 4.24 Hasil Respon <i>Step</i> terhadap Rancangan <i>Lead-Lag Compensator</i> dengan Nilai <i>Sea State</i> 4	60

Gambar 4.25 Hasil Respon <i>Step</i> terhadap <i>Rancangan Lead-Lag Compensator</i> dengan Nilai <i>Sea State</i> 8	61
Gambar 4.26 <i>Root-locus</i> Sebelum Pemberian Pengendali PID ..	62
Gambar 4.27 <i>Root-locus</i> Sesudah Pemberian Pengendali PID ..	63
Gambar 4.28 Hasil Respon <i>Step</i> pada PID Menggunakan SISOTOOL.....	64
Gambar 4.29 Uji PID Tanpa Kompensator.....	65
Gambar 4.30 Hasil Respon <i>Step</i> Uji PID Kondisi 2	65
Gambar 4.31 Uji PID dengan Penambahan Kompensator.....	66
Gambar 4.32 Hasil Respon <i>Step</i> Uji PID dengan Kompensator Kondisi 2	67
Gambar 4.33 Perbandingan Sebelum dan Sesudah Diberikan Tambahan Kompensator pada Sistem Kondisi <i>Existing</i>	67

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel Derajat Kebebasan Kapal (Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1994)	8
Tabel 2.2 Variabel Normalisasi (Fossen, Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, 2011)	14
Tabel 2.3 Deskripsi Gelombang Laut (Fossen, Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, 2011)	21
 Tabel 3.1 Spesifikasi dari Kapal Perang Kelas SIGMA Extended	26
 Tabel 4.1 Karakteristik Respon <i>Step</i> pada Sistem Tanpa <i>External Disturbances</i>	41
Tabel 4.2 Kriteria Respon yang Dibuat pada Uji Pertama	42
Tabel 4.3 Hasil Uji Kompensator <i>Lead</i> Pertama	45
Tabel 4.4 Hasil Uji Kompensator <i>Lead</i> Kedua	46
Tabel 4.5 Uji Pertama Letak <i>Pole</i> dan <i>Zero</i> untuk <i>Lead-lag compensator</i> tanpa <i>External Disturbances</i>	50
Tabel 4.6 Uji Kedua Letak <i>Pole</i> dan <i>Zero</i> untuk <i>Lead-lag compensator</i> tanpa <i>External Disturbances</i>	52
Tabel 4.7 Karakteristik Respon dengan Gangguan <i>Sea-state 4</i> ..	55
Tabel 4.8 Karakteristik Respon dengan Gangguan <i>Sea-state 5</i> ..	56
Tabel 4.9 Karakteristik Respon dengan Gangguan <i>Sea-state 6</i> ..	56
Tabel 4.10 Karakteristik Respon dengan Gangguan <i>Sea-state 7</i> ..	57
Tabel 4.11 Karakteristik Respon dengan Gangguan <i>Sea-state 8</i> ..	58
Tabel 4.12 Kedudukan Akar-akar pada Pengendali PID	62
Tabel 4.13 Parameter K_p , T_i , T_d , serta N pada MATLAB	65

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan transportasi di Indonesia memiliki kemajuan yang cukup signifikan dari tahun ke tahun, meliputi transportasi laut. Adanya industri perniagaan yang juga semakin berkembang tentu mengandalkan transportasi laut sebagai pilihannya. Luasnya perairan disekitar pulau Indonesia, seringkali membuat terjadinya permasalahan yang merugikan bagi Indonesia seperti *illegal fishing*, perebutan wilayah laut oleh negara lain, serta berbagai pencurian sumber daya alam Indonesia oleh negara lain. Hal ini menunjukkan bahwa diperlukannya peningkatan pertahanan maritim di Indonesia. Salah satunya adalah dengan menggunakan kapal patroli untuk mengamankan daerah perairan di Indonesia.

Peningkatan pertahanan maritim di Indonesia, serta peningkatan aktifitas transportasi laut lainnya akan berdampak pada semakin meningkatnya insiden dan kecelakaan transportasi laut. Banyak hal yang dapat menyebabkan terjadinya kecelakaan pada transportasi. Kecelakaan pada transportasi laut dapat disebabkan oleh kecerobohan dalam mengoperasikan sistem kemudi kapal, kurangnya kemampuan awak kapal dalam menguasai berbagai permasalahan dalam operasional kapal, kurang cermatnya dalam mendesain kapal, faktor gangguan dari alam, dan lain sebagainya (Kementrian Perhubungan RI, 2009). Kapal patroli yang nantinya dibutuhkan tentunya diharuskan untuk memiliki kemampuan manuver yang tinggi, dan mampu bertahan dengan segala jenis gangguan di perairan.

Gelombang laut merupakan salah satu faktor dari alam yang memiliki pengaruh besar terhadap berbagai kecelakaan dalam transportasi laut di Indonesia. Gelombang tinggi yang berada di perairan Kepulauan Sula Maluku Utara, Flores Timur, Laut Obi Halmahera Selatan, merupakan sebagian contoh dari perairan

yang memiliki gelombang air laut yang tinggi dan sulit diprediksi. Pada salah satu hasil penelitian dari Kurniawan dan Mohammad Arif (Kurniawan, 2014) dengan menggunakan data yang tersedia dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) ; didapatkan hasil analisa yang menunjukkan bahwa perairan Indonesia memiliki nilai *sea state* 5 sampai dengan 7. Daerah sepanjang khatulistiwa memiliki *sea state* 5, daerah Utara didominasi *sea state* 6 dan 7 sedangkan Selatan khatulistiwa memiliki *sea state* 6. Selat Makassar dan laut Jawa dengan *sea state* 5, perairan Arafura dengan *sea state* 6 serta perairan Natuna dengan *sea state* 7 yang digunakan oleh Kurniawan dan Mohammad Arif sebagai masukan dalam analisa spektrumnya dengan metode *fast fourier transform*.

Kapal perang kelas SIGMA *Extended* sudah tertanam dengan suatu sistem kendali otomatis dengan menggunakan metode kendali PID, serta pada penelitian sebelumnya pun sudah dibuat pengembangan pengendalian pada kapal dengan metode lain seperti fuzzy dan neuro-fuzzy. Perancangan yang dilakukan pada penelitian tersebut berfungsi untuk mengendalikan sudut dari heading dan kecepatan secara otomatis. Dari beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya, masih belum adanya yang membahas penambahan kompensator pada kondisi pengendali yang sudah dipasang yakni PID.

Penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan kendali kestabilan sistem melalui desain sebuah kompensator sudah dilakukan oleh Raghupati Goswami, Sourish Sanyal, dan Amar Nath Sanyal (Raghupati Goswami, 2012). Perbedaan antara penelitian ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada faktor gangguan yang diberikan kepada kapal, jenis kapal yang digunakan, jenis pengendalian yang digunakan pada kapal dan metode dalam mendapatkan hasil performansi dari kompensator kapal. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan hasil analisis kinerja kompensator ketika diberikan gangguan gelombang pada *sea state* 6 dan di atasnya, mencari interval frekuensi dari

gangguan gelombang yang mampu diatasi oleh kompensator yang terpasang pada kapal, menentukan tipe kompensator yang sesuai untuk digunakan pada kapal perang kelas *SIGMA Extended*, dan menggabungkan kompensator dengan pengendali yang telah ada pada sistem sebelumnya.

1.2 Permasalahan

Adapun permasalahan dalam pembuatan tugas akhir ini antara lain adalah:

- a. Tipe kompensator apakah yang sesuai untuk sistem kendali *heading* pada kapal perang kelas *SIGMA Extended*?
- b. Apakah kompensator yang dipilih mampu menghasilkan kondisi kestabilan pada *sea state* lebih dari 6?
- c. Bagaimana hasil analisis kinerja kompensator saat diberikan berbagai variasi gangguan?
- d. Apakah sistem kendali PID yang sudah terdapat pada kapal perang kelas *SIGMA Extended* dapat digabungkan dengan kompensator?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang dibuat pada Tugas Akhir ini antara lain adalah:

- a. Analisa kompensator dilakukan untuk jenis kapal perang kelas *SIGMA Extended*
- b. Variabel yang dikendalikan adalah sudut *yaw* pada kapal
- c. Jenis kompensator yang digunakan yakni : *Lead compensator*, *lag compensator*, dan *lead-lag compensator*.
- d. *Rudder* yang digunakan pada kapal merupakan tipe Van Amorengen
- e. Pemodelan gangguan pada laut dibuat berdasarkan kondisi nyata pada perairan di Indonesia

1.4 Tujuan

Tujuan dari pembuatan tugas akhir ini antara lain:

- a. Mendapatkan tipe kompensator yang sesuai dengan dimensi kapal perang kelas *SIGMA Extended*.
- b. Mendapatkan kompensator yang mampu menghasilkan kondisi kestabilan pada *sea state* lebih dari 6.
- c. Memperoleh hasil analisis kinerja kompensator saat diberikan berbagai variasi gangguan.
- d. Mendapatkan rancangan sistem kendali gabungan antara PID dan kompensator

1.5 Manfaat

Berdasarkan tujuan yang telah dibuat, maka manfaat dari tugas akhir ini adalah mengetahui tipe kompensator yang cocok digunakan pada kapal perang kelas *SIGMA Extended* dengan melakukan simulasi saat diberikan *disturbance* tingkat *sea state* yang bervariasi dan mencari interval frekuensi dari gangguan gelombang yang mampu diatasi kompensator.

BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Kompensator

Penjelasan mengenai kompensator dapat terbagi dalam definisi kompensator untuk pengendalian sistem dan komponen dari kompensator. Dalam penjelasan komponen, kompensator adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk mengurangi efek yang tidak diinginkan dari gerakan relatif diantara dua buah benda yang terhubung. Kompensator dapat diartikan pula sebagai komponen yang menghilangkan efek negatif dari luar sistem dengan tujuan menghasilkan suatu kestabilan.

Kompensator tidak menghilangkan gerak secara menyeluruh, namun berusaha untuk menghilangkan efek negatif dari gerakan seperti : perubahan tekanan, serta gerakan yang terlalu cepat dan menyentak dari suatu obyek. Gerakan kompensator paling sederhana adalah pada rantai jangkar kapal. Dimana rantai jangkar kapal selain mencegah kapal dari hanyut, rantai jangkar kapal juga meredam pergerakan kapal dari gelombang yang berada disekitar kapal. Kompensator yang terdapat pada kapal merupakan salah satu jenis kompensator gerak yang akan mengimbangi gerakan ke segala arah pada kapal. Namun gerakan mengimbangi tergantung dari kompensator yang digunakan, dan tentunya dipengaruhi oleh jenis sensor, perhitungan dan lainnya. Umumnya kompensator gerak menggunakan sistem pegas, dan bila gaya yang mengenai sistem sangat besar biasa digunakan pegas dengan tambahan hydropneumatic dengan menggunakan gas.

Definisi kompensator dalam sistem pengendalian, terbagi menjadi *lead compensator*, *lag compensator*, serta *lead-lag compensator*. Kompensator akan mengubah suatu sistem dinamik hingga nantinya bisa didapatkan spesifikasi sesuai yang

diinginkan diawal perancangan. Berikut penjelasan masing-masing tipe kompensator (Triwiyatno, 2012) :

a. Kompensator *Lead*

Kompensator ini dinamakan kompensator *lead* karena apabila diaplikasikan untuk *input* sinusoidal, phasa *output* yang dihasilkan akan mendahului (*leading*) phasa *input*. Persamaan yang dimasukkan ke dalam blok kompensator *lead* dapat dibuat dalam bentuk:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{\omega_p}{\omega_z} \times \frac{s + \omega_z}{s + \omega_p}$$

Dengan $\omega_p > \omega_z$

b. Kompensator *Lag*

Kompensator ini dinamakan kompensator *lag* karena apabila diaplikasikan untuk *input* sinusoidal, phasa *output* yang dihasilkan akan tertinggal (*lagging*) dari fasa input. Rangkaian elektroniknya sama dengan kompensator *lead*, hanya nilai-nilai komponennya yang akan menentukan kompensator tersebut menjadi kompensator *lag*. Yang membedakan pada fungsi alih antara kompensator *lead* dengan *lag* adalah pada besar nilai ω_p yang lebih kecil dari ω_z . Persamaan yang dimasukkan ke dalam blok kompensator *lag* dapat dibuat dalam bentuk:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{\omega_p}{\omega_z} \times \frac{s + \omega_z}{s + \omega_p}$$

Dengan $\omega_p < \omega_z$

c. Kompensator *Lead-Lag*

Kompensator *lead* secara umum akan mempercepat tanggapan sistem dan meningkatkan stabilitas sistem; sedangkan kompensator *lag* akan menaikkan akurasi *steady-state* dari sistem, tetapi cenderung memperlambat tanggapan sistem. Bila kita ingin mengembangkan sistem pengendalian yang bagus spesifikasinya

pada tanggapan transien dan tanggapan *steady-state* sekaligus, maka penggabungan kedua prinsip kompensator ini menjadi pilihan yang cukup baik untuk mencapai kriteria respon yang diinginkan.

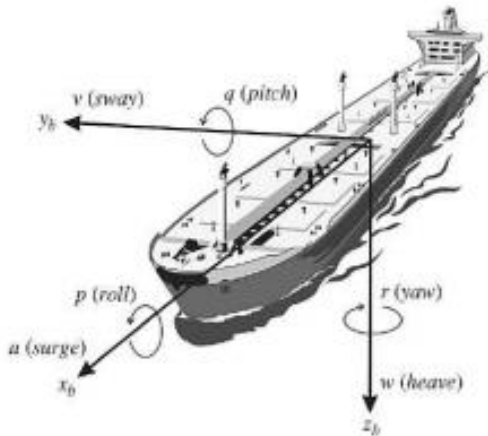
Kompensator merupakan komponen yang dalam penggunaannya, seringkali dikombinasikan dengan penggunaan pengendali PID. Pengendali PID sendiri memiliki kemampuan untuk memberikan kestabilan pada sistem dengan *input* parameter K_p , T_i , dan T_d .

Kontroler merupakan suatu komponen yang diberikan pada suatu sistem *close-loop* dengan acuan perubahan nilai berdasarkan dari selisih *error* dari sinyal *feedback* yang didapatkan dari *output* dibandingkan dengan *setpoint* awal. Dengan tujuan utamanya yakni membuat *error* menjadi 0.

Sedangkan kompensator merupakan komponen yang digunakan hanya untuk mengubah karakteristik dari sistem seperti : fasa sinyal. Kompensator biasa digunakan bersama kontroler untuk menambahkan *pole* dan *zero* pada sistem disaat kontroler sendiri tidak mampu mencapai kestabilan.

2.2 Pergerakan Kapal Translasi dan Rotasi

Pergerakan kapal dibagi menjadi gerakan translasi dan gerakan rotasi. 3 gerakan translasi yakni surge, sway dan heave dimana kapal bergeser pada lintasan x, y, z. Ditambah dengan 3 gerakan rotasi yakni roll, pitch dan yaw yang ditunjukkan arah perputarannya dengan p, q, dan r. Arah dari pergerakan kapal dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut:



Gambar 2. 1 Komponen Gerak pada Kapal (Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1994)

Keenam gerakan pada kapal yang ditunjukkan pada gambar di atas disebut juga sebagai 6 DOF (*Six Degrees Of Freedom*). Penjelasan mengenai gerakan kapal ini tertera lebih jelas pada derajat kebebasan kapal dalam Tabel 2.1 berikut (Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1994) :

Tabel 2. 1 Tabel Derajat Kebebasan Kapal (Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1994)

DOF	Gerakan/rotasi	Gaya / momen	Kecepatan linear dan angular	Posisi dan sudut euler
1	Gerakan menuju arah x (<i>surge</i>)	X	u	x
2	Gerakan menuju arah y (<i>sway</i>)	Y	v	y
3	Gerakan menuju arah z (<i>heave</i>)	Z	w	z

DOF	Gerakan/rotasi	Gaya / momen	Kecepatan linear dan angular	Posisi dan sudut euler
4	Rotasi pada sumbu x (<i>roll</i>)	K	p	ϕ
5	Rotasi pada sumbu y (<i>pitch</i>)	M	q	θ
6	Rotasi pada sumbu z (<i>yaw</i>)	N	r	ψ

Bentuk persamaan non-linear dari 6 derajat kebebasan dapat dibuat dalam bentuk berikut:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau$$

Dimana tiap bagian menjelaskan:

M = matriks inersia (diikuti dengan penambahan massa)

$C(v)$ = matriks dari *coriolis* dan disebut gaya sentripetal

V = vektor kecepatan yang didapatkan dengan $v = [u, v, r]^T$

$D(v)$ = matriks redaman

$g(\eta)$ = vektor dari gaya dan momen gravitasi

τ = vektor dari input pengendali

2.3 Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended*

Kapal SIGMA (*Ship Integrated Geometrical Modularity Approach*) merupakan kapal yang dirancang dan digunakan oleh TNI Angkatan Laut dengan sistem propulsi dan kemampuan untuk berlayar yang cukup baik. Kapal perang kelas SIGMA digunakan untuk patroli di Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE), misi anti kapal selam (ASW) dan untuk misi SAR (*Search And Rescue*) (Artilleri, 2014). Adapun untuk kapal yang digunakan pada penelitian ini adalah SIGMA *Extended* dimana kapal ini merupakan hasil pengembangan dari kapal SIGMA sebelumnya dengan kemampuan yang lebih baik dengan spesifikasi kapal yang sedikit berbeda dari kapal SIGMA sebelumnya.

Beberapa sebutan yang dipakai dalam spesifikasi kapal adalah sebagai berikut (Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, 1994) :

- *LOA (Length Overall)*

LOA digunakan untuk mengetahui panjang kapal keseluruhan. Diukur dari titik terdepan haluan kapal hingga titik belakang kapal secara sejajar.

- *Draught*

Draught menunjukkan berat total antara LWT dengan displacement yang dibuat dalam ton.

- *Displacement*

Menunjukkan massa kapal dalam satuan ton.

- *Breadth*

Breadth menunjukkan lebar kapal.

- *DWT (Dead Weight Tonage)*

Deadweight menunjukkan berat total muatan dimana kapal dapat mengangkut dalam keadaan pelayaran optimal dengan draft maksimum. Serta menunjukkan selisih berat kapal maksimum dikurangi dengan berat kapal ketika kosong.

- *Bruto Register Tons*

Menunjukkan volume keseluruhan dari kapal.

- *Netto Register Tons*

Menunjukkan volume kapal yang dikurangi dengan jumlah isi dari ruangan yang tidak dipakai untuk mengangkut muatan pada kapal.

- *Beam*

Beam menunjukkan jarak maksimum antara dua sisi kapal.

- *Draft*

Draft menunjukkan bagian kapal yang terendam air dengan kondisi kapal berisi muatan maksimum.

- FWA (*Fresh Water Allowance*)

Menunjukkan besarnya perubahan draft ketika kapal berpindah dari suatu perairan yang memiliki berat jenis berbeda.

- DWA (*Dock Water Allowance*)

Menunjukkan jarak perpindahan secara otomatis bila kapal berlayar dilaut.

Terdapat pula koefisien hidrodinamika kapal yang berpengaruh besar pada kemampuan manuver kapal, terdiri dari (Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1994):

- *Length Between Perpendicular (LBP)*

Semakin panjang dimensi dari suatu kapal maka akan berpengaruh pada tahanan kapal, kecepatan kapal, serta kemampuan manuver dari kapal.

- Lebar Kapal (B)

Penambahan lebar pada kapal umumnya digunakan untuk mendapatkan penambahan ruangan pada kapal, namun hal ini berpengaruh pada kecepatan kapal bila dilihat pada perhitungan koefisien blok.

- Tinggi Kapal

Memiliki pengaruh pada kenaikan tinggi titik berat kapal (*center of gravity*). Dapat berpengaruh pada keseluruhan nilai koefisien blok.

- Sarat Kapal

Memberikan pengaruh pada tinggi *center of bouyancy*. Dapat berpengaruh pada keseluruhan nilai koefisien blok.

- *Displacement*

Menunjukkan besarnya jumlah air yang dipindahkan oleh bagian kapal yang tenggelam dalam air. Memiliki satuan ton dan dapat dihitung menggunakan rumus :

$$\Delta = L \times B \times C_B \times T \times \rho$$

Dimana ρ menunjukkan massa jenis air yang dipindahkan.

- Koefisien Blok (C_B) (KBismarck, 2004)

Merupakan perbandingan antara volume badan kapal yang tercelup dalam air dibanding volume blok dengan panjang kapal.

Nilai koefisien blok yang kecil akan berpengaruh pada kecepatan kapal yang akan semakin meningkat sehingga dapat ditemukan nilai C_B yang kecil pada kapal dengan kecepatan tinggi, begitupun sebaliknya. Rumus yang digunakan untuk menghitung koefisien blok ditunjukkan dengan (KBismarck, 2004) :

$$C_B = \frac{V}{L_{wl} \times B \times T}$$

Dengan V menunjukkan volume kapal, L_{wl} yang menunjukkan panjang garis air, B lebar kapal dan T yang menunjukkan sarat kapal.

2.4 Pemodelan Dinamika Kapal SIGMA *Extended*

Pemodelan dinamika kapal dimulai dengan merumuskan persamaan 6 derajat kebebasan untuk suatu benda kaku (*rigid body*). Persamaan untuk gerak translasi dan rotasi pada suatu benda kaku (*rigid body*) dapat dituliskan sebagai (Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1994) :

$$m[\ddot{u} - ur + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X$$

$$m[\ddot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = Y$$

$$m[\ddot{w} - up + up - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = Z$$

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K$$

$$I_y \dot{q} + (I_z - I_x)rp + m[z_G(\ddot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\ddot{u} - vr + wq)] = N$$

Persamaan 6 derajat kebebasan pada benda kaku (*rigid body*) merepresentasikan keseluruhan gerak pada kapal di sumbu X_o , Y_o , dan Z_o . Persamaan kemudian dilanjutkan untuk diturunkan dengan menggunakan asumsi distribusi homogen dan bidang xz dianggap simetris, sehingga $I_{xz} = I_{yz} = 0$ dan gerakan *heave*, *roll*, serta *pitch* yang diabaikan sehingga $w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q} = 0$. Sehingga substitusi nilai pada persamaan 6 derajat kebebasan awal menghasilkan :

$$m(\ddot{u} - vr - x_g r^2) = X$$

$$m(\ddot{v} - ur - x_g \dot{r}) = Y$$

$$I_z \dot{r} + mx_g(\dot{v} + ur) = N$$

Ketiga persamaan hasil substitusi nilai dari asumsi yang dibuat menjelaskan perhitungan untuk gerakan *surge*, *sway*, dan *yaw* pada kapal.

Selanjutnya, dalam persamaan gerak pada suatu benda kaku (*rigid body*) diperlukan proses normalisasi untuk mengubah persamaan pada kapal yang didapatkan menjadi bentuk non dimensional. Perubahan bentuk menjadi non-dimensional dapat menggunakan Tabel 2.2 yakni *Prime System*.

Contoh bentuk yang perlu dilakukan normalisasi adalah pada koefisien hidrodinamika kapal. Perhitungan koefisien hidrodinamika dilakukan pada suatu *prototype* dalam bentuk kapal yang tidak sesuai dengan ukuran aslinya. Sehingga dengan normalisasi ; persamaan dapat digunakan pada ukuran kapal aslinya. Normalisasi dapat dilihat untuk setiap *unit* pengukurannya pada tabel 2.2 berikut:

Tabel 2. 2 Variabel Normalisasi (Fossen, Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, 2011)

Spesifikasi (satuan)	<i>Prime System I</i>	<i>Prime System II</i>
Panjang (m)	L	L
Massa (kg)	$\frac{\rho}{2} L^3$	$\frac{\rho}{2} L^2 T$
Momen inersia (kg/m ²)	$\frac{\rho}{2} L^5$	$\frac{\rho}{2} L^4 T$
Waktu (s)	$\frac{L}{U}$	$\frac{L}{U}$
Area referensi (m ²)	L^2	LT
Posisi (m)	L	L
Sudut	1	1
Kecepatan linier	U	U

Spesifikasi (satuan)	<i>Prime System I</i>	<i>Prime System II</i>
Kecepatan sudut	$\frac{U}{L}$	$\frac{U}{L}$
Akselerasi linier	$\frac{U^2}{L}$	$\frac{U^2}{L}$
Akselerasi sudut	$\frac{U^2}{L^2}$	$\frac{U^2}{L^2}$
Gaya	$\frac{\rho}{2} U^2 L^2$	$\frac{\rho}{2} U^2 L T$
Momen	$\frac{\rho}{2} U^2 L^3$	$\frac{\rho}{2} U^2 L^2 T$

Model dinamika kapal keseluruhan yang dilakukan oleh Nomoto dalam bentuk orde dua dapat dituliskan sebagai (Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1994):

$$\frac{\psi}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1+T_3s)}{s(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (2.1)$$

Nilai K_R , T_1 , T_2 , dan T_3 didapatkan dengan menggunakan rumus berikut:

$$K_R = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)} \quad (2.2)$$

$$K_R T_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det(N)} \quad (2.3)$$

$$T_1 T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)} \quad (2.4)$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)} \quad (2.5)$$

Dengan keterangan :

$$i = 1, 2 ; j = 1, 2$$

Redaman pada b_1, b_2 dapat dicari dengan menggunakan rumus :

$$b_1 = \frac{(I_z - N_{\dot{r}})Y_{\delta} - (mx_G - Y_{\dot{r}})N_{\delta}}{\det(M)} \quad (2.6)$$

$$b_2 = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_{\delta} - (mx_G - N_{\dot{v}})Y_{\delta}}{\det(M)} \quad (2.7)$$

Variabel m_{ij}, n_{ij}, b_i didapatkan dari matriks yang dibentuk berdasarkan teori linear Davidson dan Schiff dengan persamaan :

$$Y = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{\delta}\delta_R \quad (2.8)$$

$$N = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_v v + N_r r + N_{\delta}\delta_R \quad (2.9)$$

Asumsi yang digunakan diawal mengenai untuk gerakan *surge*, *sway*, dan *yaw* serta asumsi bidang simetris tetap digunakan, sehingga didapatkan :

$$M\dot{v} + N(u_o)v = b\delta_r \quad (2.10)$$

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$N(u_o) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_o - Y_r \\ -N_v & I_z - N_r \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$b = \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Tiap variabel pada matriks memiliki penjelasan berikut:

m = massa kapal

$Y_{\dot{v}}$ = turunan gerakan *sway* terhadap \dot{v}

$Y_{\dot{r}}$ = turunan gerakan *yaw* terhadap \dot{r}

$N_{\dot{r}}$ = turunan momen *yaw* terhadap \dot{r}

Y_v = turunan gerakan *sway* terhadap v

Y_r = turunan gerakan *yaw* terhadap r

N_v = turunan momen *sway* terhadap v

N'_r = turunan momen *yaw* terhadap r

$N_{\dot{v}}$ = turunan momen *sway* terhadap \dot{v}

x_G = pusat massa

I_z = inersia terhadap z didapatkan dengan massa kapal dan notasi putaran kapal menjadi :

$$I_z = mx_G^2 + I_r \quad (2.14)$$

Y_δ, N_δ = besar gaya dan momen *rudder* didapatkan dengan :

$$Y_\delta = \rho \frac{\pi A_\delta}{4 L T} \quad (2.15)$$

$$N_\delta = -\frac{1}{2} Y_\delta \quad (2.16)$$

Variabel non-dimensi nantinya akan melalui proses normalisasi. Untuk mencari variabel dengan non dimensi digunakan persamaan yang dikemukakan oleh Clarke D. (D Clarke, 1983) :

$$\frac{-Y_{\dot{v}}'}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16 + \frac{C_{BB}}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^2 \quad (2.17)$$

$$\frac{-Y_{\dot{v}}'}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.4 \frac{C_{BB}}{T} \quad (2.18)$$

$$\frac{-Y_{\dot{r}}'}{\pi(T/L)^2} = 0.67 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.0033 \left(\frac{B}{T}\right)^2 \quad (2.19)$$

$$\frac{-Y_{\dot{r}}'}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.08 \left(\frac{B}{T}\right) \quad (2.20)$$

$$\frac{-N_{\dot{v}}'}{\pi(T/L)^2} = 1.1 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.041 \left(\frac{B}{T}\right) \quad (2.21)$$

$$\frac{-N_{\dot{v}}'}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.4 \left(\frac{T}{L}\right) \quad (2.22)$$

$$\frac{-N_{\dot{r}}'}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.017 \frac{C_B B}{T} - 0.33 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.23)$$

$$\frac{-N_{\dot{r}}'}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0.039 + \frac{B}{T} - 0.56 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.24)$$

Dari model persamaan pada (2.1) dapat dituliskan ke dalam bentuk *state space*, menjadi :

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (2.25)$$

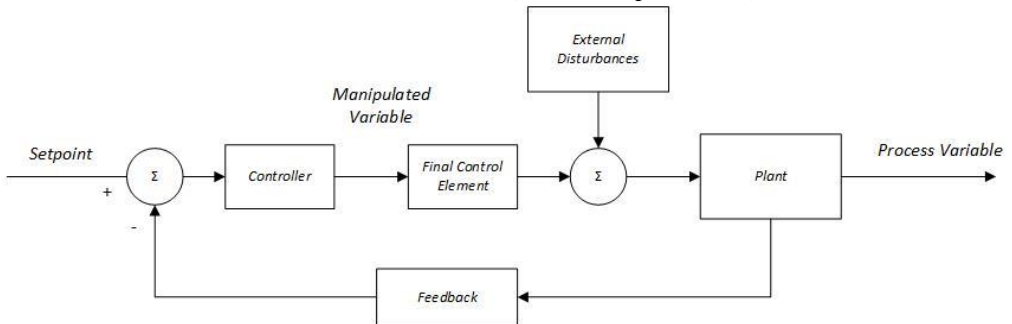
Dengan v menunjukkan kecepatan *sway*, r menunjukkan kecepatan angular, ψ menunjukkan sudut *heading* dan δ_R menunjukkan defleksi *rudder*. Nilai $a_{11}, a_{21}, a_{12}, a_{22}$ diambil berdasarkan bentuk berikut (Fossen, Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, 2011):

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I'_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_v & mu_o - Y_r & 0 \\ -N_v & mx_G u_o - N_r & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (2.26)$$

2.5 Sistem Pengendalian

Sistem kendali atau sistem kontrol (*control system*) adalah suatu atau sekumpulan alat yang digunakan untuk mengendalikan, memerintah, dan mengatur keadaan dari suatu sistem. Untuk mendapatkan nilai yang diinginkan, diperlukan adanya sistem kontrol yang terbagi menjadi dua, yakni :

- Sistem kendali manual (*Open Loop Control*)
Merupakan sistem pengendalian dimana operator akan mengubah variabel secara manual setelah diamati nilainya
- Sistem kendali otomatis (*Close Loop Control*)



Gambar 2. 2 Bentuk Diagram Blok Sistem *Close Loop* (Ogata, 2002)

Merupakan salah satu sistem kendali yang melakukan koreksi secara otomatis, dan tidak membutuhkan bantuan operator. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya *feedback* pada *loop* yang menuju input setelah dikurangkan dengan nilai *set-point* nya. Sehingga nantinya hasil keluaran akan selalu stabil sesuai dengan set-point yang diharapkan.

2.6 Model Gangguan Pada Kapal

Terdapat berbagai gangguan yang mampu mempengaruhi kapal disaat melakukan pelayaran, antara lain gangguan yang disebabkan oleh angin, arus dan gelombang laut yang tinggi.

Dalam tugas akhir ini akan digunakan gangguan gelombang dimulai dari *sea state* 6 keatas, dengan tujuan untuk menguji apakah kompensator mampu mengatasi gangguan gelombang yang diberikan. Pemodelan dinamika gangguan gelombang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$y(s) = h(s)w(s)$$

Dimana $w(s)$ merupakan *zero mean gaussian white noise process*. Adapun fungsi transfer orde dua yang digunakan :

$$h(s) = \frac{K_\omega s}{s^2 + 2\zeta\omega_o s + \omega_o^2} \quad (2.32)$$

Dimana ω_o merupakan frekuensi gelombang, ζ adalah *damping coefficient*, dan K_ω yang menunjukkan nilai *gain constant*. Untuk nilai *gain constant* sendiri dapat dihitung menggunakan (Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1994):

$$K_\omega = 2\zeta\omega_o\sigma_\omega$$

Dimana σ_ω menunjukkan konstanta intensitas gelombang, ζ sebagai koefisien redaman dan ω_o merupakan frekuensi gelombang. Terdapat pula pemodelan gelombang yang dibuat oleh Pierson dan Moskowitz dengan memanfaatkan data kecepatan angin dan ketinggian gelombang laut tertentu dengan bentuk (Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1994):

$$S(\omega) = A\omega^{-5}\exp(-B\omega^{-4}) \quad (2.33)$$

$$A = 8.1 \times 10^{-3} g^2 \quad (2.34)$$

$$B = 0.74 \left(\frac{g}{v}\right)^4 \quad (2.35)$$

Tabel 2. 3 Deskripsi Gelombang Laut (Fossen, Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, 2011)

<i>Sea state</i>	Deskripsi	Tinggi gelombang (m)	Dunia	Atlantik utara	Atlantik selatan
0	<i>Calm (glassy)</i>	0	-	-	-
1	<i>Calm (rippled)</i>	0 – 0.1	11.24 8	8.3103	6.0616
2	<i>Smooth (wavelets)</i>	0.1 – 0.5	-	-	-
3	<i>Slight</i>	0.5 – 1.25	31.68 5	28.1996	21.5683
4	<i>Moderate</i>	1.25 – 2.5	40.19 4	42.0273	40.9915
5	<i>Rough</i>	2.5 – 4	12.8	15.4435	21.2383
6	<i>Very rough</i>	4 – 6	3.025	4.2938	7.0101
7	<i>High</i>	6 – 9	0.926	1.4968	2.6931
8	<i>Very high</i>	9 – 14	0.119	0.2263	0.4346
9	<i>Phenomenal</i>	Di atas 14	0.000 9	0.0016	0.0035

Hubungan antara ketinggian gelombang dengan kecepatan angin dapat dicari dengan rumus :

$$H_s = 0.21 \frac{v^2}{g} \quad (2.36)$$

Sedangkan untuk perioda modal gelombang dan frekuensinya dapat dinyatakan dalam :

$$T_0 = 2\pi \sqrt[4]{\frac{5}{4B}} ; \omega_0 = \sqrt[4]{\frac{4B}{5}} \quad (2.37)$$

Hingga hasil substitusi rumus 2.34 ke 2.35 menghasilkan :

$$\omega_o = 0.88 \frac{g}{v} = 0.40 \frac{\sqrt{g}}{H_s} \quad (2.38)$$

2.7 Diagram Nyquist

Diagram Nyquist merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengetahui kestabilan mutlak dari suatu sistem *loop* tertutup dengan menggambarkan karakteristik tanggapan frekuensi pada suatu diagram dengan hasil substitusi $S = j\omega$. Metode tanggapan frekuensi memiliki kelebihan yakni fungsi alih sistem dapat ditentukan secara eksperimen dengan mengukur tanggapan frekuensi (Aisjah)

Tanggapan frekuensi Nyquist dapat digambarkan pada bidang kompleks dengan memasukkan nilai frekuensi dari $\omega = 0$ hingga $\omega = \infty$ dan dilanjutkan dengan penyusunan rentang frekuensi yang diinginkan pada tabel maka akan didapatkan kesimpulan bahwa sistem akan stabil apabila bidang sebelah kanan kurva $G(j\omega)H(j\omega)$ tidak melingkupi titik $(-1, 0)$. (Rahajoeningroem, 2010)

2.8 Diagram Root-Locus

Diagram root locus merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui kestabilan pada suatu sistem dengan melihat akar-akar kedudukan pada bentuk *transfer function* yang dianalisa. Akar akar berada disebelah kanan garis *centroid* menandakan bahwa sistem dapat dikatakan stabil. Adapun letak garis *Centroid* dapat dibuat dengan menggunakan bentuk :

$$\frac{\sum \text{finite poles} - \sum \text{finite zeros}}{n - m}$$

Dimana dari bentuk di atas menunjukkan pengurangan dari jumlah posisi *pole* dan *zero* dibagi dengan jumlah dari *pole* dan *zero*.

2.9 Diagram Bode

Diagram Bode merupakan metode yang digunakan untuk menganalisa hasil respon suatu sistem dengan penggambaran perbandingan antara gain dengan frekuensi, dan fasa dengan

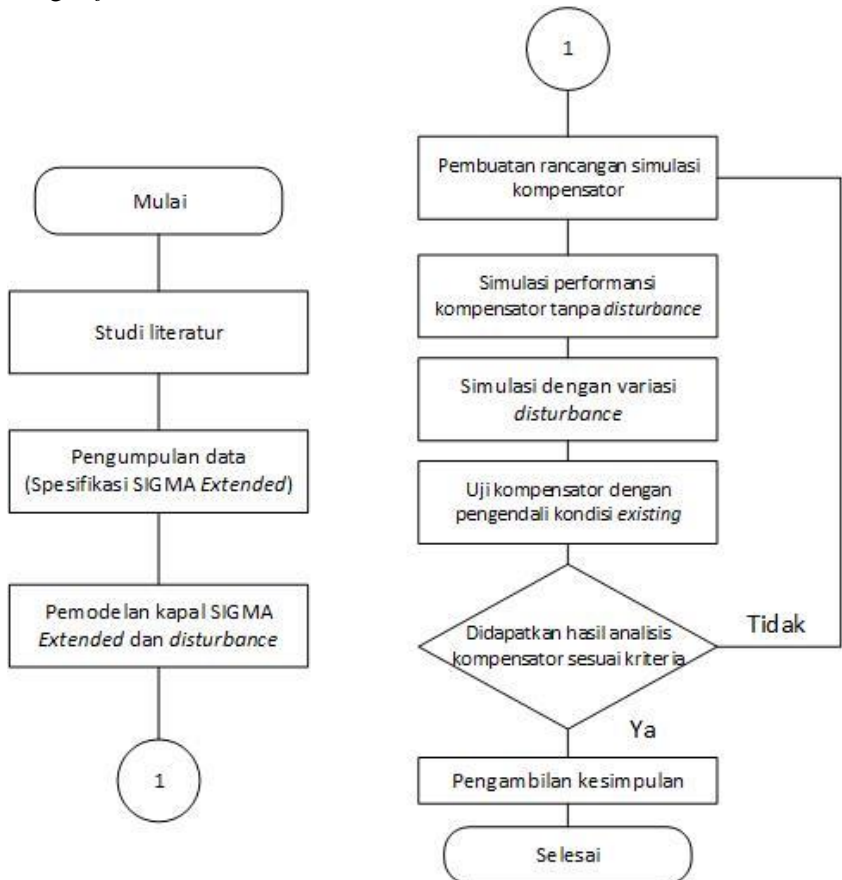
frekuensi dimana biasa gain dituliskan dalam dB dan fasa dalam rad/s.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan penelitian pada tugas akhir ini dilakukan sesuai dengan *flowchart* berikut:



Gambar 3. 1 *Flowchart* Tugas Akhir

3.1 Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses awal dalam pelaksanaan penelitian ini. Dalam tahapan ini akan dipelajari prinsip dasar dari kompensator, tahapan dalam memulai pemodelan kapal, sistem kendali, tahapan untuk melakukan simulasi dalam MATLAB, pembuatan model gangguan pada kapal, serta berbagai sistem kendali otomatis yang sudah ada pada kapal sebelumnya.

3.2 Pengumpulan Spesifikasi Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended*

Sebelum memulai pengujian dari kompensator terhadap kapal, diperlukan proses pemodelan sistem kapal terlebih dahulu dan dimulai dengan mencari spesifikasi lengkap dari kapal yang akan dibuat modelnya, yakni kapal perang kelas SIGMA *Extended*. Berikut ini adalah spesifikasi lengkap dari kapal perang kelas SIGMA *Extended* :

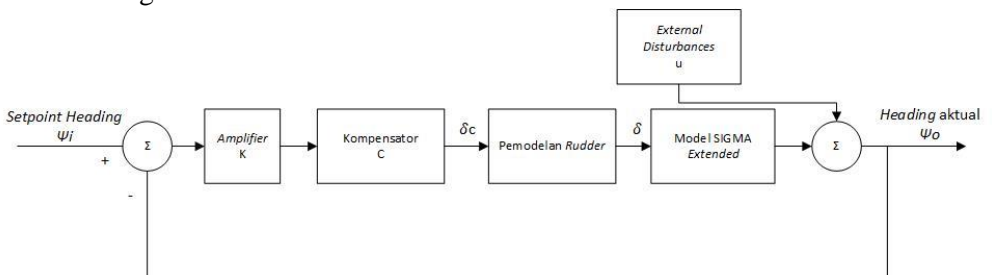
Tabel 3. 1 Spesifikasi dari Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended*

Besaran		Satuan	
LBP	Panjang	106 m	106 m
U	Kecepatan	27.9 knot	14.4 m/s
B	Lebar	14 m	14 m
T	Sarat	3.7 m	3.7 m
C_B	Koefisien blok	0.44	0.44
X_G	Spesifikasi gravitasi	2.22	2.22

Besaran		Satuan	
A_δ	Luasan rudder	3.856 m^2	3.856 m^2
m	<i>Displacement</i>	2423 ton	2423000 kg
R	Jari-jari girasi	21.1 m	21.1 m
m'	Massa non dimensional	0,0040126	0,0040126
X_G'	Gravitasi non dimensional	0	0

3.3 Pemodelan Kapal Perang Kelas SIGMA *Extended* dan *External Disturbances*

Setelah didapatkan data spesifikasi dari kapal perang kelas SIGMA *Extended*, maka dapat dilanjutkan dengan mencari tiap variabel non-dimensi seperti Y'_v , Y'_p , Y'_r , Y'_r , dan lainnya dengan persamaan Clarke pada (2.17) hingga (2.24) dengan menggunakan data spesifikasi seperti lebar kapal, tinggi kapal, koefisien blok, *specific gravity* dan lainnya. Sebelumnya, dalam melakukan analisis kompensator pada kapal perang kelas SIGMA *Extended*, rancangan pemodelan akan disusun sesuai dengan diagram blok berikut:



Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem Pengendalian

Hasil perhitungan dengan persamaan Clarke (2.17) didapatkan :

$$\begin{aligned}
 Y'_v &= -0.0045 \\
 Y'_v &= -0.00637 \\
 Y'_{\dot{r}} &= -0.00016 \\
 Y'_r &= 0.001959 \\
 N'_v &= 0.0000377 \\
 N'_v &= -0.00223 \\
 N'_{\dot{r}} &= -0.00026 \\
 N'_r &= -0.00124
 \end{aligned}$$

Setiap variabel non-dimensi yang didapat perlu untuk di normalisasi menjadi bentuk dimensional. Sebelumnya dilakukan penyusunan hasil non-dimensional pada matriks M dan N sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 M' &= \begin{bmatrix} 0.008517142 & 0.000157793 \\ -3.76921E-05 & 0.000320058 \end{bmatrix} \\
 N' &= \begin{bmatrix} 0.006373563 & -0.001959328 \\ 0.002233396 & 0.129512843 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Dari hasil non-dimensonal yang didapat, dilakukan proses normalisasi untuk tiap baris dan kolom dari matriks M' dan N' dengan metodenya masing-masing sesuai dengan tabel normalisasi *Prime System*, sehingga didapatkan matriks M dan N menjadi :

$$\begin{aligned}
 M &= \begin{bmatrix} 0.004353863 & 0.008550138 \\ -1.92678E-05 & 0.017342622 \end{bmatrix} \\
 N &= \begin{bmatrix} 0.000442609 & -0.014422834 \\ 0.000155097 & 0.215854739 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Dengan didapkannya matriks hasil normalisasi, dilanjutkan dengan pencarian nilai b_1 dan b_2 dengan memanfaatkan hasil determinan matriks M dan nilai lain yang didapatkan sebelumnya seperti Y'_r , N'_r , Y_δ , N_δ dan lainnya hingga didapatkan hasil :

$$\begin{aligned} b_1 &= 0.052455055 \\ b_2 &= -0.441478979 \end{aligned}$$

Nilai b_1 dan b_2 yang sudah didapatkan kemudian digunakan untuk mencari K_R , $K_R T_3$, $T_1 T_2$, serta $T_1 + T_2$ sebelum nantinya dimasukkan ke dalam persamaan Nomoto. Berikut adalah hasil K_R , $K_R T_3$, $T_1 T_2$, dan $T_1 + T_2$ yang didapatkan :

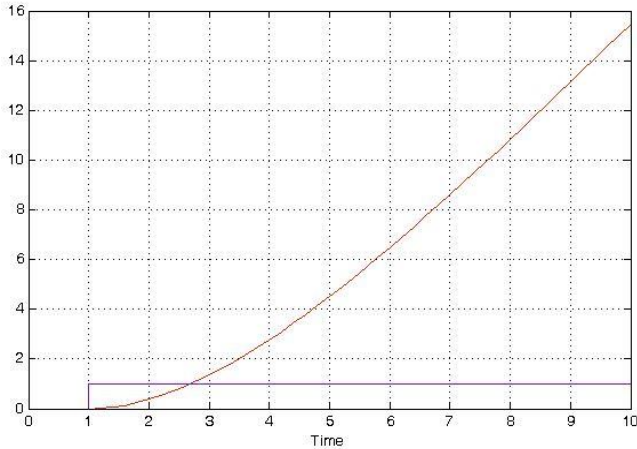
$$\begin{aligned} K_R &= 2.081674455 \\ K_R T_3 &= 19.64824437 \\ T_1 T_2 &= 24.02121122 \\ T_1 + T_2 &= 9.673878977 \end{aligned}$$

Substitusi hasil yang didapat ke dalam persamaan Nomoto, dimana nantinya akan diubah ke dalam bentuk *state-space* dari bentuk :

$$\begin{aligned} \frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} &= \frac{K_R(1 + T_3 s)}{s(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} = \frac{K_R + K_R T_3 s}{T_1 T_2 s^3 + (T_1 + T_2)s^2 + s} \\ \frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} &= \frac{19.64824s + 2.081674455}{24.02121122s^3 + 9.673879s^2 + s} \end{aligned}$$

Dari hasil fungsi transfer kapal perang kelas SIGMA Extended yang didapatkan di atas, dapat dituliskan juga sebagai bentuk *state-space* apabila gangguan yang nantinya diberikan berbentuk *state-space*. Disini akan dilakukan pengujian *open loop* pada sistem yang didapat dengan menggunakan MATLAB 2013

untuk mengetahui respon yang nantinya terlihat pada *scope* dengan tampilan sebagai berikut:



Gambar 3. 3 Hasil Respon Uji Open Loop dengan Fungsi *Step*

Blok SIMULINK pemodelan kapal nantinya dapat menggunakan bentuk *transfer function* langsung dari persamaan Nomoto menggunakan *numerator* dan *denominator* atau dalam bentuk *state-space* dengan menggunakan fungsi *tf2ss* berikut pada MATLAB :

```
num = [19.64824437 2.081674455];
den = [24.02121122 9.673878977 1 0];
[A,B,C,D] = tf2ss(num,den)
```

Sehingga dari hasil konversi *transfer function*, dimasukkan [A, B, C, D] dalam blok *state-space* dengan masing-masing nilai sebagai berikut:

$$A = [-0.4027 \ -0.0416 \ 0; 1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0]$$

$$B = [1; 0; 0]$$

$$C = [0 \ 0.8180 \ 0.0867]$$

$$D = [0]$$

3.4 Pemodelan Gangguan Kapal Tiap Sea State

Proses pemodelan gangguan kapal pada tiap *sea-state* mengacu pada persamaan (2.32) dengan bentuk $h(s)$, dimana $K_\omega = 2\xi\omega_0\sigma_\omega$ dengan acuan nilai ξ dan σ_ω sesuai dengan data perairan internasional yakni memiliki nilai 0.1 dan 3.16. Tetapan gravitasi menggunakan 9.8 m/s^2 . Sebagai catatan, nilai H pada rentang *sea-state* diambil nilai ketinggian paling maksimum.

Sea-state 4 – Ketinggian 1,25 – 2,5 m

$$\omega_0 = 0.4 \frac{\sqrt{9.8}}{2.5} = 0.791$$

$$\omega_0^2 = 0.627$$

$$h_4(s) = \frac{0.499s}{s^2 + 0.158s + 0.627}$$

Sea-state 5 – Ketinggian 2,5 – 4 m

$$\omega_0 = 0.4 \frac{\sqrt{9.8}}{4} = 0.628$$

$$\omega_0^2 = 0.394$$

$$h_5(s) = \frac{0.396s}{s^2 + 0.125s + 0.394}$$

Sea-state 6 – Ketinggian 4 – 6 m

$$\omega_0 = 0.4 \frac{\sqrt{9.8}}{6} = 0.511$$

$$\omega_0^2 = 0.261$$

$$h_6(s) = \frac{0.322s}{s^2 + 0.102s + 0.261}$$

Sea-state 7 – Ketinggian 6 – 9 m

$$\omega_0 = 0.4 \frac{\sqrt{9.8}}{9} = 0.417$$

$$\omega_0^2 = 0.173$$

$$h_7(s) = \frac{0.263s}{s^2 + 0.083s + 0.173}$$

Sea-state 8 – Ketinggian 9 – 14 m

$$\omega_0 = 0.4 \frac{\sqrt{9.8}}{14} = 0.334$$

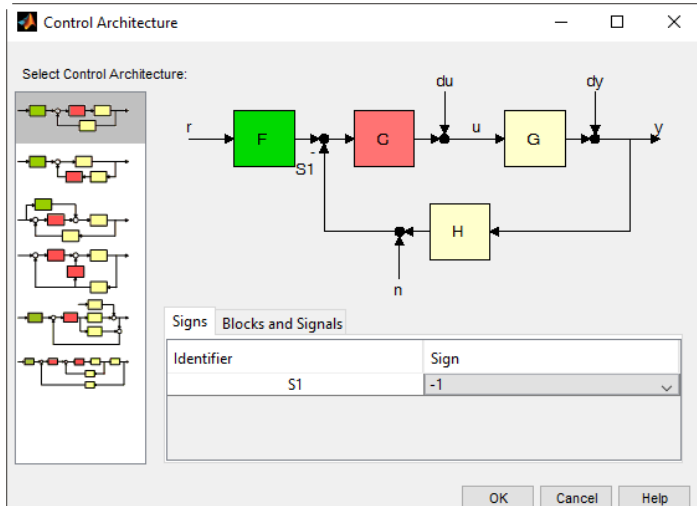
$$\omega_0^2 = 0.111$$

$$h_8(s) = \frac{0.211s}{s^2 + 0.066s + 0.111}$$

3.5 Pembuatan Rancangan Simulasi Kompensator

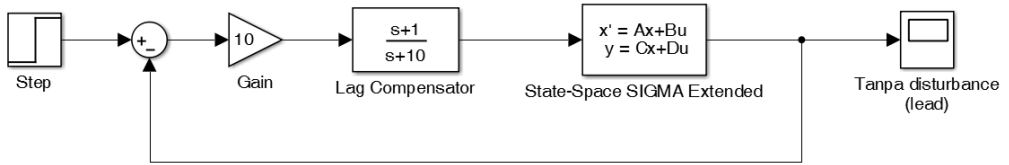
Pembuatan rancangan simulasi kompensator dibuat dengan menggunakan dua langkah, yakni menguji kompensator yang cocok untuk digunakan pada sistem sesuai dengan kedudukan akar-akar pada *root-locus*, *phase margin* pada Bode dan lainnya

menggunakan SISOTOOL. Rancangan pembuatan kompensator diletakkan pada blok C sesuai dengan arsitektur kontrol berikut:

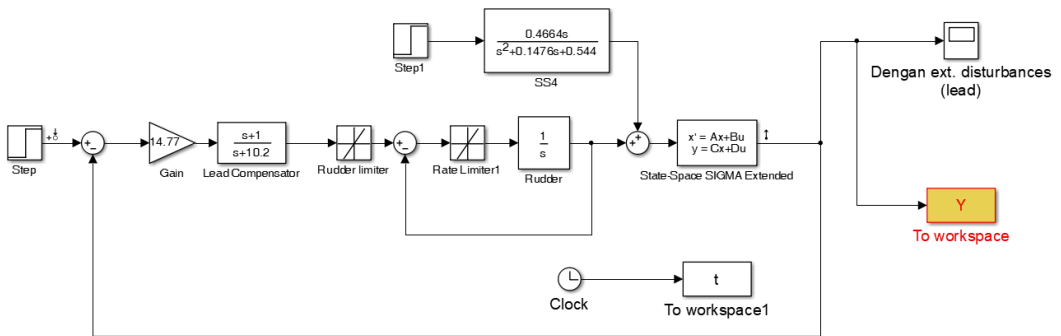


Gambar 3. 4 Arsitektur Kontrol Standar pada SISOTOOL

Rancangan kompensator yang sudah dapat memenuhi *design requirement* selanjutnya diambil bagian blok kompensator untuk dipindahkan menuju simulink yang nantinya akan diberikan gangguan gelombang dengan frekuensi rendah dan tinggi dalam bentuk *state-space*. Sehingga model yang digunakan dalam blok G dibuat dalam bentuk *state-space* beserta *disturbance* yang digunakan. Berikut adalah tampilan rancangan pada simulink setelah kompensator diuji dan dianalisa pada SISOTOOL :

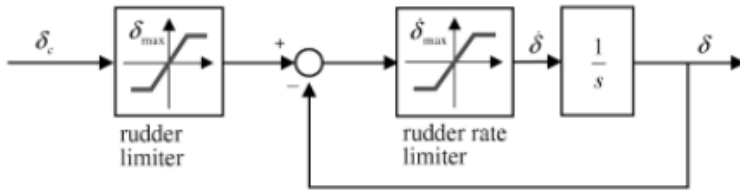


Gambar 3. 5 Tampilan Desain Awal Kompensator Tanpa *External Disturbances* dan Batasan Heading Rudder



Gambar 3. 6 Tampilan Desain Awal Kompensator Dengan *External Disturbances* dan Batasan Heading Rudder

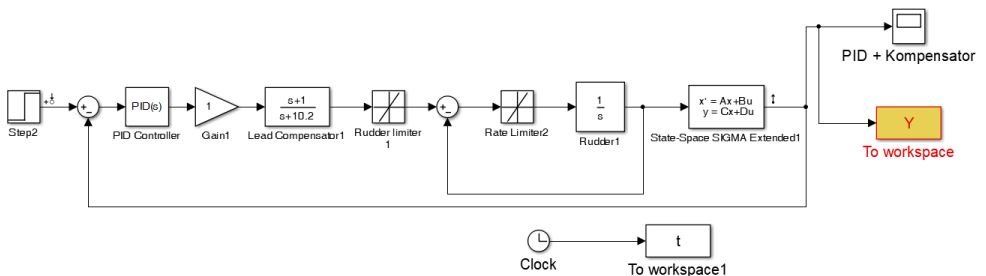
External disturbances yang diinput ke dalam bentuk *transfer function* $h(s)$ sesuai dengan hasil perhitungan pada sub-bab 3.4, dengan pemodelan *rudder* yang dibuat sesuai Fossen dan Jesús De la Cruz pada *Automation for the Maritime Industries* dengan bentuk :



Gambar 3. 7 Blok Diagram *Rudder* dengan *Limiter* (Cruz, 2005)

Rudder limiter dan *rudder rate limiter* pada simulink dimana menjelaskan *range* kerja dari *rudder* dibuat sesuai spesifikasi Rolls-Royce yakni $-30^\circ < x < 35^\circ$ dan laju kerja *rudder* yakni $-2.5^\circ - 7^\circ$. (Roll-Royce, n.d.)

Penelitian mengenai kompensator yang diberikan pada sistem yang sudah memiliki pengendali sebelumnya seperti *PID controller* juga dilakukan dengan menggunakan blok pada simulink. Berikut tampilan uji penambahan kompensator pada pengendali PID:

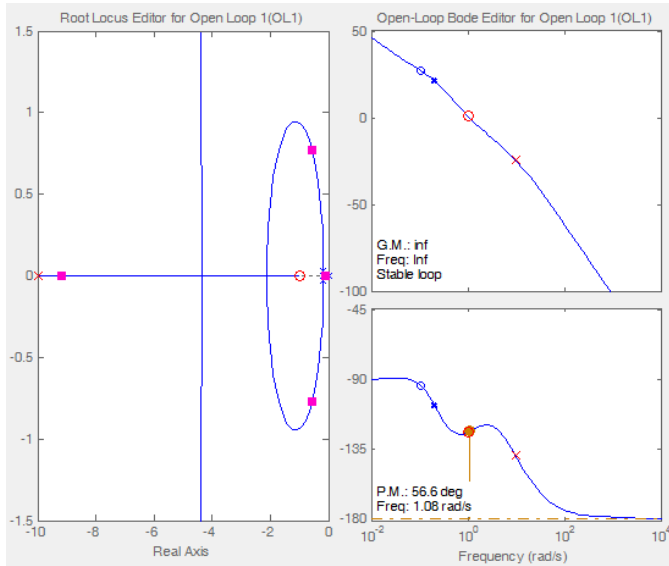


Gambar 3. 8 Desain Penambahan Kompensator pada Pengendali PID

3.6 Analisa Hasil Simulasi

Analisa hasil simulasi awal dilakukan pada SISOTOOL untuk mengetahui kestabilan dari kompensator yang digunakan dengan melihat letak kedudukan akar, nilai *gain*, *phase margin*, *rise time*

dari sistem serta *settling time* dan *max overshoot* dari kompensator yang telah dibuat.



Gambar 3. 9 Kestabilan Hasil Desain pada *Root-locus* dan *Bode*

Dari analisa kompensator yang dibuat pada SISOTOOL, kemudian dilanjutkan dengan mengambil persamaan desain kompensator yang telah dibuat dan memenuhi karakteristik respon yang diinginkan untuk dipindahkan ke dalam blok rancangan simulink seperti tertera pada gambar 3.4 dan 3.5.

3.7 Penyusunan Laporan

Setelah melakukan pemodelan dari dinamika Kapal Perang Kelas SIGMA Extended, membuat desain simulasi performansi kompensator pada MATLAB dan mengetahui kompensator yang tepat untuk digunakan pada gangguan gelombang tertentu, dilanjutkan dengan penyusunan keseluruhan hasil ke dalam bentuk laporan Tugas Akhir.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Awal pada Sistem Tanpa *External Disturbances* dan batasan Heading Rudder

Dalam menentukan penggunaan kompensator yang tepat pada sistem yang digunakan, diperlukan analisa terlebih dahulu pada hasil keluaran respon berdasarkan fungsi transfer dari sistem yang dikehendaki ; dimana dalam pengujian pertama bagan yang diubah pada blok hanya pada bagian G, dan arsitektur kontrol yang digunakan standar dari SISOTOOL dengan *feedback*, sistem/proses yang dikontrol pada G, blok F serta H berupa *unit* yang nilainya tidak diubah (1), *unit input* r, *unit output* y, blok *controller/compensator*, *negative feedback* pada S1, dan *du* serta *dy* sebagai masukan *external disturbances* yang akan dimasukkan di analisa selanjutnya.

Perlu diketahui bahwa pengujian pertama yang dilakukan pada sistem tidak menggunakan *disturbance* terlebih dahulu serta *rate* dan *rate limiter* untuk *rudder*. Hal ini bertujuan untuk mengetahui kriteria respon yang dihasilkan oleh transfer function kapal perang kelas SIGMA Extended sendiri dalam menerima inputan sinyal dari kompensator yang akan di desain.

Penulisan pemodelan kapal perang kelas SIGMA Extended ke dalam blok G sesuai pada gambar 3.3 dapat dilakukan dengan mengetik *command* baik dalam *state-space* maupun *numerator* dan *denominator* dalam bentuk *transfer function* dengan hasil yang sama. Disini dituliskan kembali persamaan Kapal SIGMA Extended yang didapatkan dari model nomoto dan mengubahnya ke dalam bentuk *numerator* dan *denominator* pada MATLAB.

$$\frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} = \frac{19.64824s + 2.081674455}{24.02121122s^3 + 9.673879s^2 + s}$$

```
num = [19.64824437 2.081674455];
den = [24.02121122 9.673878977 1 0];
G=tf(num,den) % Transfer Function SIGMA Extended
```

Selanjutnya dilakukan pemanggilan *command* SISOTOOL serta pengambilan nilai *pole* dan *zero* sistem sebelum diubah.

```
p=pole(G) % list pole tf
z=zero(G) % list zero tf
sisotool(G)
```

Didapatkan hasil pada *command window* untuk *pole* dan *zero* sebelum diubah adalah

p =

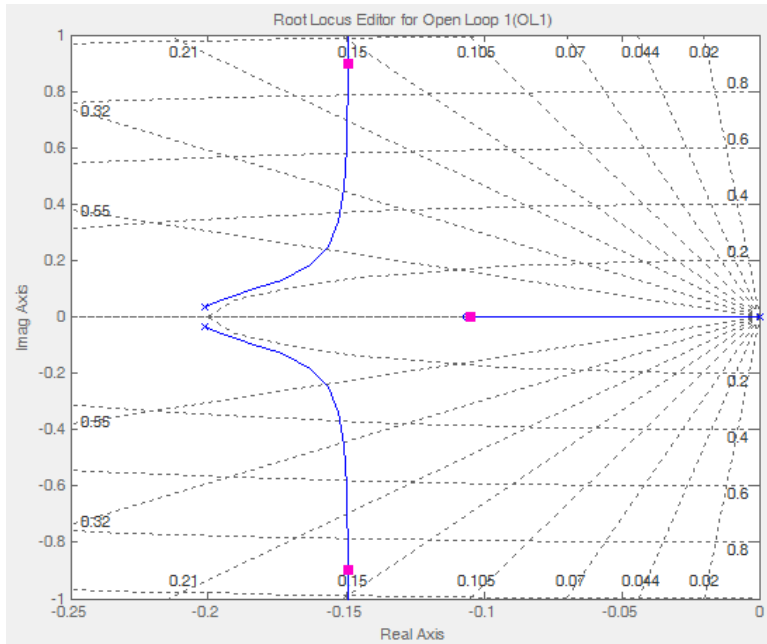
```
0.0000 + 0.0000i
-0.2014 + 0.0329i
-0.2014 - 0.0329i
```

z =

```
-0.1059
```

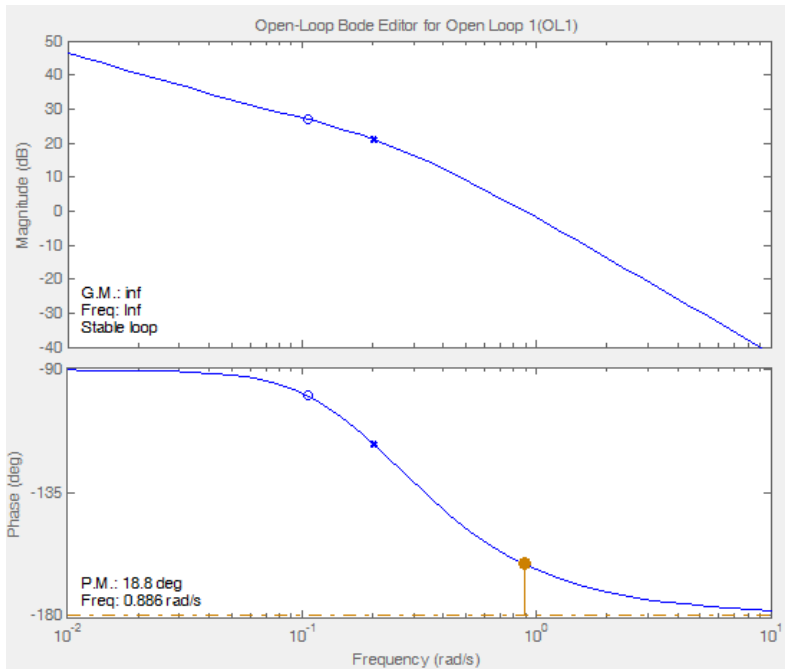
Untuk *command* sisotool (G) akan langsung memunculkan *tools* yang berisikan diagram untuk uji *root-locus* serta *Bode*. Dalam uji ini dapat diketahui kestabilan dari sistem dengan melihat dari letak kedudukan akar-akar pada *root-locus* serta melihat *gain* dan *margin phase* pada *Bode*. Berikut adalah tampilan dari letak kedudukan akar dari *transfer function* sistem

yang sudah dimasukkan ke dalam MATLAB dan ditandai dengan tanda silang dan lingkaran sebagai penunjuk *pole* dan *zero* nya.



Gambar 4. 1 Hasil Pembuatan Awal Diagram Root-Locus pada (G) yakni Sistem Tanpa *External Disturbances*

Dari diagram yang dihasilkan pada *root-locus* dapat dilihat bahwa letak kedudukan akar-akar berada di sebelah kiri ; dimana menandakan bahwa sistem termasuk stabil. Dilanjutkan dengan diagram Bode yang ditunjukkan sebagai berikut:

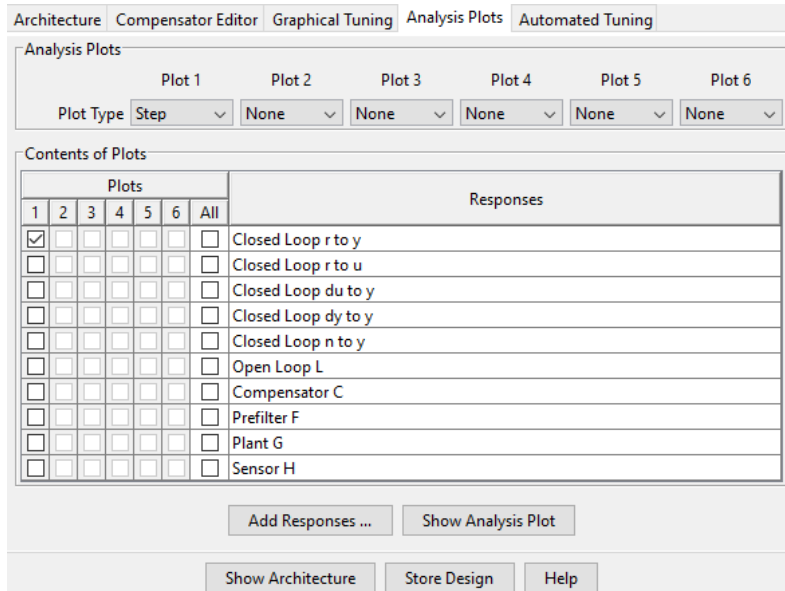


Gambar 4. 2 Hasil Pembuatan Awal Diagram Bode pada (G) yakni Sistem Tanpa *External Disturbances*

Diagram Bode yang dihasilkan menunjukkan *phase margin* berada pada 18.8° dan frekuensi pada 0.886 rad/s. Untuk penambahan kompensator pada sistem nantinya akan mempengaruhi *phase margin* pada diagram Bode sesuai dengan peletakan *pole* dan *zero*. *Phase margin* dapat dibuat acuan dalam pembuatan desain kompensator, dan Gain mampu menaikkan dan menurunkan kurva pada diagram Bode. Dengan memanfaatkan diagram Bode maka akan mempermudah untuk mengetahui pada frekuensi berapakah sistem akan menjadi tidak stabil terhadap gain ataupun *pole* dan *zero* yang dibuat.

Analisa dilanjutkan dengan memunculkan *plot* hasil inputan step dari *r* menuju output *y*. Dari *tab analysis plots* dapat diambil

tempat mulai respon step akan dianalisa, dimana disini dipilih *closed-loop r to y* dan diambil respon *step*.

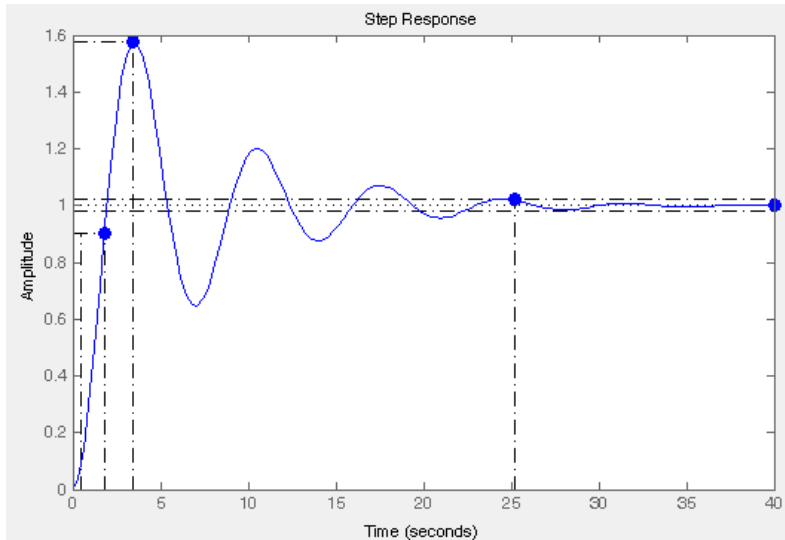


Gambar 4. 3 Aturan yang Dibuat pada *Plot Analysis* untuk Memunculkan *Step/Nyquist* dari Masukan R Menuju Keluaran Y

Dengan memunculkan hasil *plot* dapat dilihat pada gambar 4.5 dimana hasil respon *step* terhadap sistem menghasilkan respon dengan karakteristik sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Karakteristik Respon *Step* pada Sistem Tanpa *External Disturbances*

<i>Rise time (seconds)</i>	1.31
<i>Peak amplitude</i>	1.57
<i>Overshoot (%)</i>	57.4 dengan waktu 3.4 s
<i>Settling time (seconds)</i>	25.2



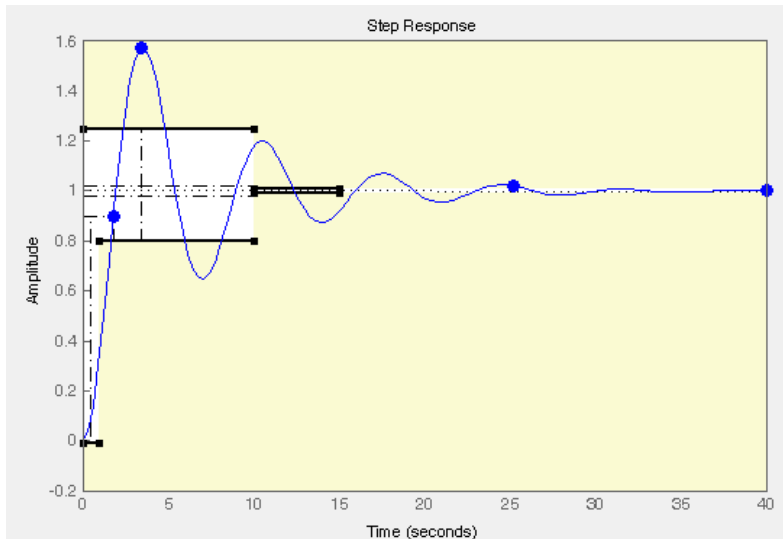
Gambar 4. 4 Hasil Pembuatan Awal Respon *Step* (G) pada Sistem Tanpa *External Disturbances*

Penentuan desain kompensator dipengaruhi dari seberapa cepat waktu yang dibutuhkan pada sistem untuk stabil (*settling time*), *rise time*, *Gain* dan *margin phase*, serta *error steady state* yang dikehendaki. Disini akan dibuat asumsi kriteria yang dibutuhkan pada SIGMA Extended adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 2 Kriteria Respon yang Dibuat pada Uji Pertama

<i>Rise time (seconds)</i>	1
<i>Overshoot (%)</i>	25
<i>Settling time (seconds)</i>	10

Dengan memasukkan *design requirement*, pada diagram terbentuk batasan maksimum *overshoot* yang dibutuhkan demi mencapai kriteria yang dikehendaki seperti terlihat pada gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Penambahan *Design Requirement* pada Sistem Tanpa *External Disturbances*

Dari *design requirement* yang telah ditentukan, dilanjutkan dengan penentuan letak *pole* dan *zero* berupa tiga tipe kompensator dan penentuan *gain* yang sesuai pada sistem tanpa *external disturbances*.

4.11 Lead Compensator Pada Sistem Tanpa External Disturbances dan batasan Heading Rudder

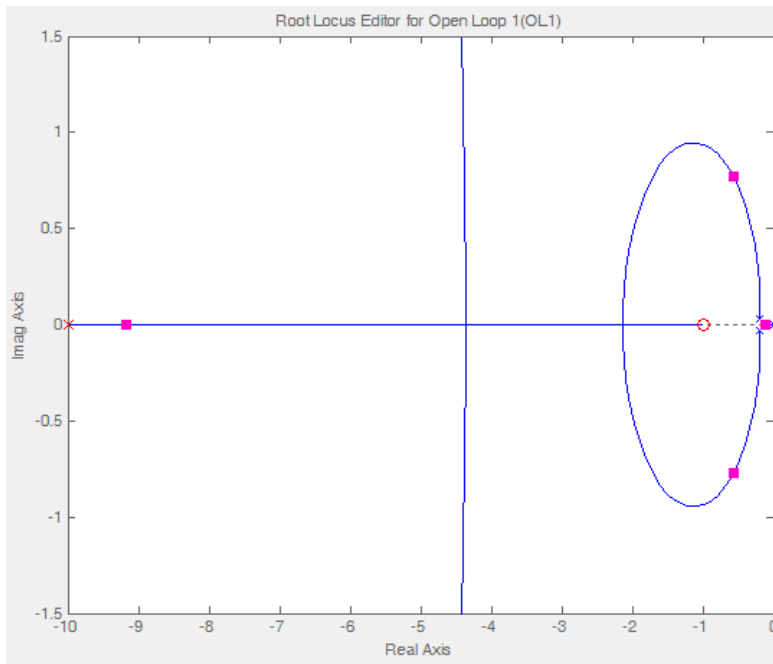
Analisa pertama dimulai dengan memberikan *lead compensator* pada sistem dengan posisi *pole* pada -10 dan *zero* pada -1 yang ditunjukkan pada gambar 4.6. Dengan rumus kompensator lag sebagai berikut:

$$\frac{\omega_p}{\omega_z} \times \frac{s + \omega_z}{s + \omega_p}$$

Dengan $\omega_p > \omega_z$, *gain* kompensator yang dibuat 10, maka dituliskan bentuk desain kompensator *lead* pertama adalah:

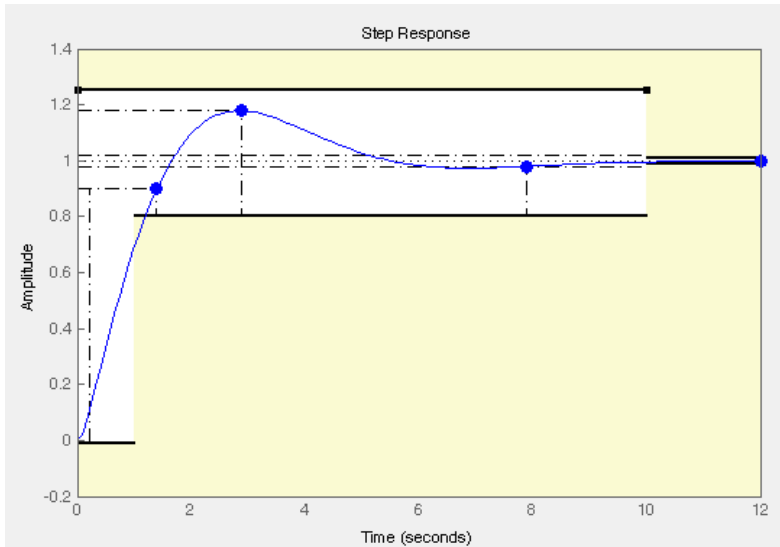
$$10 \times \frac{(s + 1)}{(s + 10)}$$

Letak kedudukan akar-akar yang terlihat pada *root-locus* dapat terlihat pada gambar berikut:



Gambar 4. 6 Letak *Pole* dan *Zero* Uji Kompensator *Lead* Pertama pada -1, 10

Selanjutnya untuk mengetahui respon sistem dengan kompensator yang telah dibuat, dimunculkan kembali respon *step* dengan hasil sebagai berikut:



Gambar 4. 7 Respon *Step* Uji Kompensator *Lead* Pertama

Dari uji *lead compensator* pertama, karakteristik respon yang dihasilkan berubah dan hampir mendekat *design requirement* yang ditentukan diawal dengan nilai :

Tabel 4. 3 Hasil Uji Kompensator *Lead* Pertama

<i>Rise time (seconds)</i>	1.19
<i>Peak amplitude</i>	1.18
<i>Overshoot (%)</i>	17.9 dengan waktu 2.88 s
<i>Settling time (seconds)</i>	7.9

Terlihat bahwa *settling time* sudah jauh lebih baik dari sebelum diberi kompensator dan *design requirement* awal yang ditentukan. Namun *rise time* yang masih belum memenuhi kriteria yakni 1 detik. Sehingga dilanjutkan perubahan nilai *gain* kompensator dengan menarik *pole* ke -10.24 hingga dihasilkan bentuk *lead compensator* kedua menjadi :

$$14.77 \times \frac{(s + 1)}{(s + 10.2)}$$

Perlu diperhatikan pula pada saat merubah nilai *pole* dan *zero* pada sistem yakni *phase margin* pada diagram Bode untuk mengetahui apakah sistem akan tetap stabil dengan nilai kompensator baru yang dibuat. Hasil perubahan *gain* dan *pole* pada uji kompensator *lead* kedua menghasilkan karakteristik respon sebagai berikut:

Tabel 4. 4 Hasil Uji Kompensator *Lead* Kedua

<i>Rise time (seconds)</i>	0.895
<i>Peak amplitude</i>	1.17
<i>Overshoot (%)</i>	17.2 dengan waktu 2.22 s
<i>Settling time (seconds)</i>	4.21

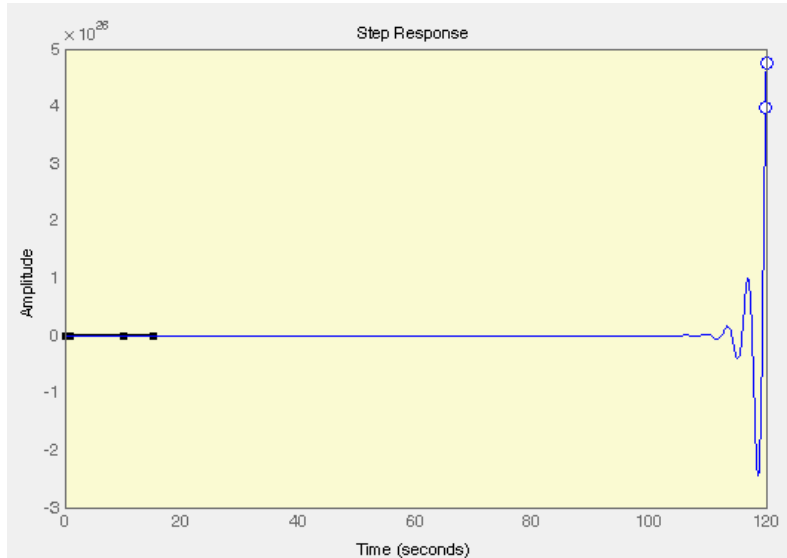
Dengan semua karakteristik yang dihasilkan pada uji kompensator *lead* kedua, maka dapat dikatakan bahwa *lead compensator* uji kedua cocok dengan *design requirement* yang dibutuhkan sebelumnya pada kapal SIGMA Extended. Hal ini dikarenakan sifat *lead compensator* yang memperbaiki respon transien dari sistem.

4.12 Lag Compensator Pada Sistem Tanpa External Disturbances dan batasan Heading Rudder

Pada analisa kedua dibuat kompensator *lag* dengan posisi *pole* dan *zero* diletakkan pada -10 dan -1, yakni kebalikan dari *lead compensator* dimana posisi *pole* disini akan dibuat untuk lebih dekat terhadap *centroid* dengan tujuan untuk membuat atenuasi pada frekuensi tinggi dengan *pole* dan mengurangi fasa. Kompensator *lag* dengan *pole* yang lebih besar dari *zero* dibuat dalam bentuk:

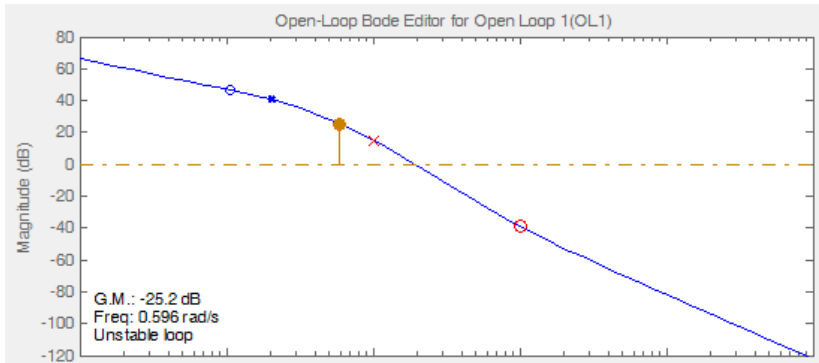
$$1 \times \frac{(s + 10)}{(s + 1)}$$

Dengan hasil respon *step* sebagai berikut:



Gambar 4. 8 Respon *Step* Uji Kompensator *Lag* Pertama Tanpa *External Disturbances*

Dari hasil respon *step* yang didapatkan, terlihat bahwa hasil *output* tidak stabil dengan peletakan *pole* dan *zero* berupa *lag compensator* di -10, -1. Hal ini pun terlihat pada hasil *plot* pada diagram Bode yang menunjukkan sistem tidak stabil pada frekuensi 0.596 rad/s

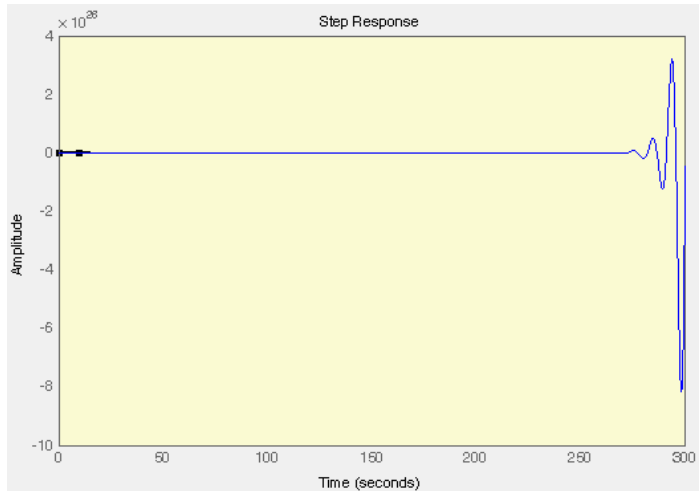


Gambar 4. 9 Respon Diagram Bode pada Uji Kompensator *Lag* Pertama

Selanjutnya dilakukan pengujian kembali dengan pergeseran letak *pole* dan *zero* serta perubahan nilai *gain* untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan *design requirement*.

Dalam percobaan kedua, dilakukan pergeseran *gain*, *pole* yang mendekati *centroid* ke kanan, serta *zero* yang dibuat kekiri pada *root locus* dengan bentuk kompensator :

$$0.0333 \times \frac{(s + 19)}{(s + 0.269)}$$



Gambar 4. 10 Respon *Step Uji Kompensator Lag Kedua Tanpa External Disturbances*

Dari perubahan nilai *gain* pada *lag compensator* terlihat bahwa respon dari sistem tetap menghasilkan keluaran yang tidak stabil. Tujuan dari *lag compensator* sendiri adalah untuk membuat atenuasi frekuensi tinggi pada *loop* sistem dan mengurangi *error* keseluruhan pada sistem. Namun dari kedua *lag compensator* yang dibuat menunjukkan bahwa perubahan nilai *gain* menjadi lebih tinggi hanya akan membuat sistem tidak stabil dengan waktu respon keluaran yang lebih singkat ; perubahan *zero* lebih rendah (dari -10 ke titik -19) akan membuat semakin tingginya peak overshoot pada ketidakstabilan sistem dan perubahan nilai *pole* akan mempengaruhi osilasi respon pada sistem.

4.13 Lead - Lag Compensator Pada Sistem Tanpa External Disturbances dan batasan Heading Rudder

Setelah melihat hasil dari penambahan dari desain kompensator *lead* dan *lag*, selanjutnya akan dibuat desain *lead-*

lag compensator dimana akan dilakukan penggabungan dari kedua jenis kompensator untuk ditambahkan ke sistem.

Lead compensator dengan *lag compensator* biasa digabungkan untuk mendapatkan *margin phase* tertentu yang besarnya bervariasi dari waktu ke waktu sehingga dibutuhkan perubahan di setiap detik responnya. Untuk pembuatan *lead-lag compensator* dimulai dengan penentuan *pole* dan *zero* dari masing-masing tipe kompensator. Letak awal *pole* dan *zero* keadaan pertama diletakkan sebagai berikut:

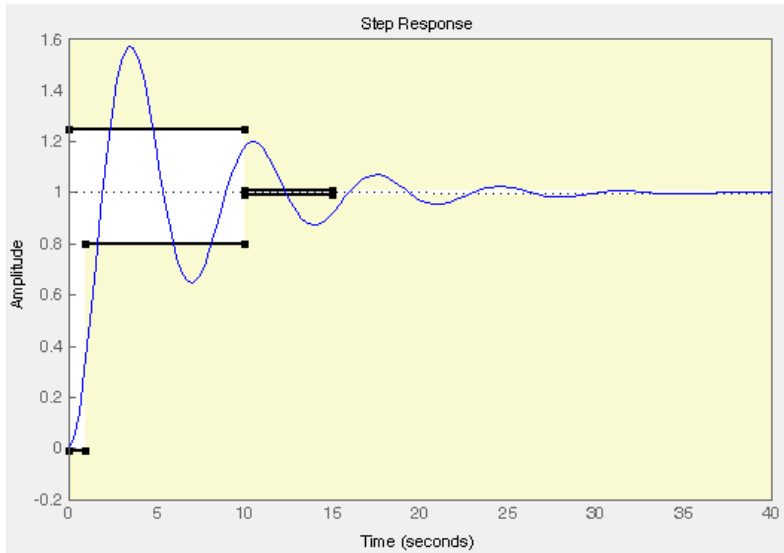
Tabel 4. 5 Uji Pertama Letak *Pole* dan *Zero* untuk *Lead-lag compensator* tanpa *External Disturbances*

Tipe	<i>Pole</i>	<i>Zero</i>
<i>Lead compensator</i>	-1	-10
<i>Lag compensator</i>	-10	-1

Peletakan *pole* dan *zero* dibuat dalam bentuk :

$$1 \times \frac{(s + 1)(s + 10)}{(s + 10)(s + 1)}$$

Maka hasil pembuatan *step* menjadi :



Gambar 4. 11 Respon *Step* Uji Kompensator *Lead-Lag* Pertama

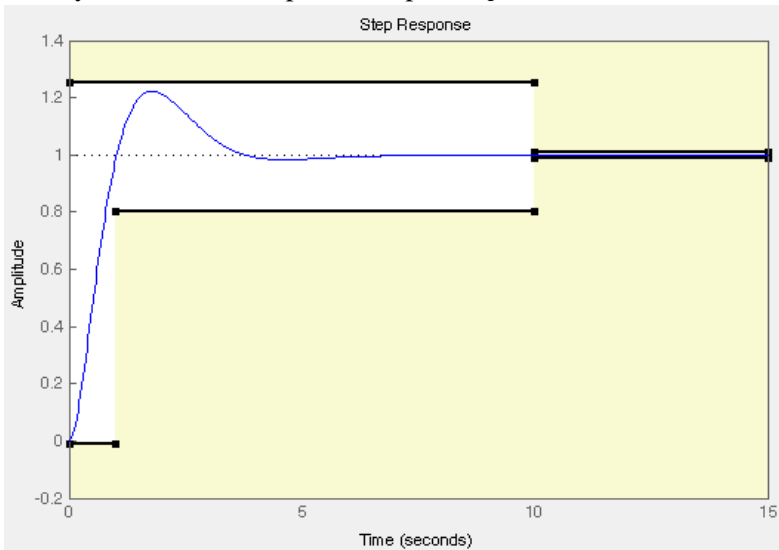
Dari hasil respon *step* yang didapatkan, terlihat bahwa penggabungan antara *lead* dengan *lag compensator* pada sistem ini tidak dapat menghasilkan kriteria respon sesuai dengan *design requirement* awal yang dibuat menggunakan *pole* dan *zero* $(-1, -10 ; -10, -1)$. Hal ini dapat disebabkan oleh peletakan *pole* dan *zero* yang mengikuti aturan *lag*, menyebabkan efek *lead* yang tertutup seluruhnya.

Selanjutnya dilakukan perubahan letak *pole*, *zero*, serta *gain* dengan menarik letak kedudukan *lead* dan *lag* yang sudah dibuat dengan tujuan memenuhi *design requirement* awal yang telah dibuat. Hasil paling mendekati didapatkan dengan letak kedudukan akar-akar sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Uji Kedua Letak *Pole* dan *Zero* untuk *Lead-lag compensator* tanpa *External Disturbances*

Tipe	<i>Pole</i>	<i>Zero</i>
<i>Lead compensator</i>	-0.992	-10
<i>Lag compensator</i>	-10	-5.13

Dengan *gain* yang dihasilkan setelah pergeseran kedudukan akar-akar yakni 9.3864 didapatkan respon *step* :

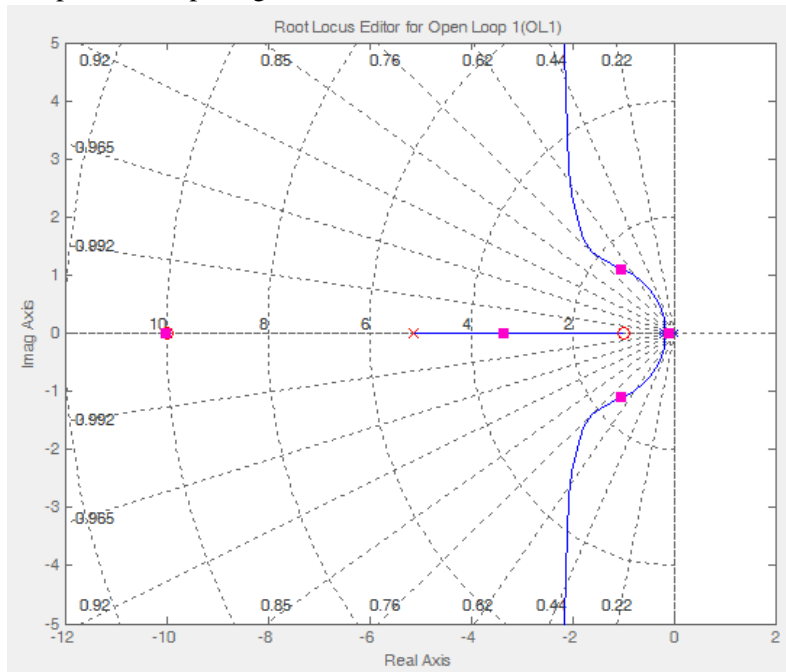


Gambar 4. 12 Respon *Step* Uji Kompensator *Lead-Lag* Kedua

Transfer function yang dihasilkan dari hasil perubahan nilai *gain* beserta kedudukan akar-akar yang nantinya akan dijadikan masukan pada simulink, dimana dapat dituliskan sebagai :

$$9.3864 \times \frac{(s + 0.992)(s + 10)}{(s + 10)(s + 5.13)}$$

Adapun hasil pergeseran letak kedudukan akar-akar pada *root locus* dapat terlihat pada gambar berikut:



Gambar 4. 13 Letak Kedudukan Akar-Akar pada *Lead-Lag Compensator Tanpa External Disturbances*

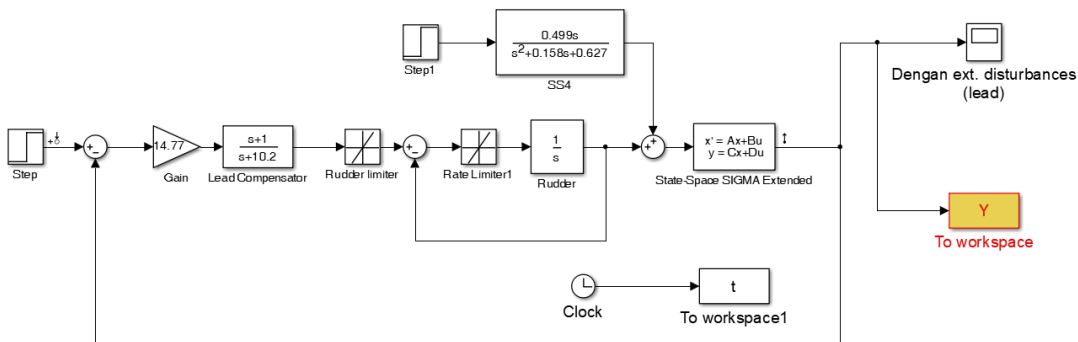
4.2 Analisa Penambahan Kompensator pada Sistem dengan *External Disturbances*

Setelah membuat desain kompensator pada sistem tanpa *external disturbances* dan mengetahui respon dari sistem kapal perang SIGMA Extended, dilanjutkan dengan rancangan desain dengan menggunakan *disturbances* dan *rate limiter* pada rudder dengan tujuan untuk melihat performansi kompensator sesuai dengan keadaan riil. Desain awal kompensator yang dipakai masih menggunakan desain awal tanpa *disturbance* ; dilanjut

dengan optimasi kompensator untuk mengubah kedudukan akar-akar sesuai dengan keadaan *sea-state* masing-masing.

4.2.1 Lead Compensator

Pengujian *lead compensator* pertama dilakukan dengan menggunakan kompensator yang memiliki kedudukan akar-akar dengan hasil terbaik disaat tanpa diberikan *external disturbances*. Pengujian kali ini dilakukan untuk melihat apakah kompensator masih mampu mempertahankan kriteria respon yang diinginkan dengan *disturbance* yang diberikan. Pengujian dilakukan secara berurutan sesuai dengan keadaan *sea state* 4-8. Berikut adalah rancangan simulink yang dibuat :

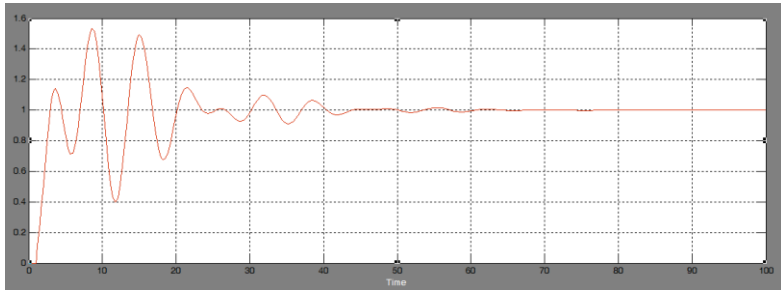


Gambar 4. 14 Tampilan Rancangan *Lead Compensator* dengan *External Disturbances*

Pada rancangan yang telah dibuat, dilakukan perubahan pada blok *Sea-state* dimulai dari *Sea-state* 4 hingga 8.

Sea-state 4 – Ketinggian 1,25 – 2.5 m

$$h_4(s) = \frac{0.499s}{s^2 + 0.158s + 0.627}$$



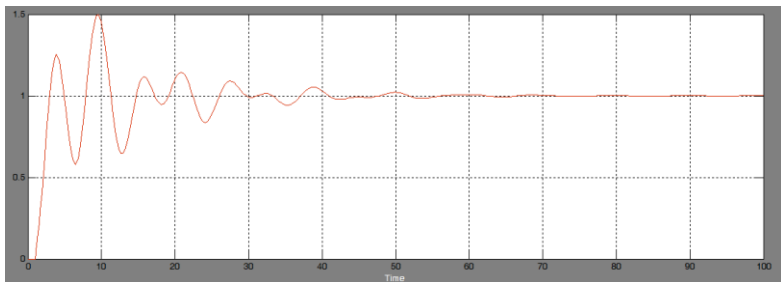
Gambar 4. 15 Hasil Respon *Step* terhadap Rancangan *Lead Compensator* dengan Nilai *Sea State* 4

Tabel 4. 7 Karakteristik Respon dengan Gangguan *Sea-state* 4

<i>Peak time (seconds)</i>	8.57
<i>Overshoot (%)</i>	84.66
<i>Settling time (seconds)</i>	37.21

Sea-state 5 – Ketinggian 2,5 – 4 m

$$h_5(s) = \frac{0.396s}{s^2 + 0.125s + 0.394}$$



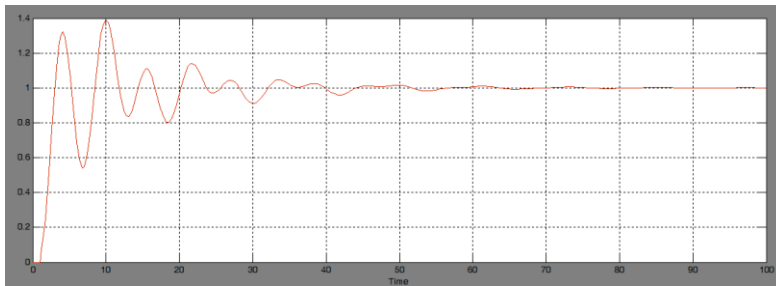
Gambar 4. 16 Hasil Respon *Step* terhadap Rancangan *Lead Compensator* dengan Nilai *Sea State* 5

Tabel 4. 8 Karakteristik Respon dengan Gangguan *Sea-state 5*

<i>Peak time (seconds)</i>	9.64
<i>Overshoot (%)</i>	85.001
<i>Settling time (seconds)</i>	40.97

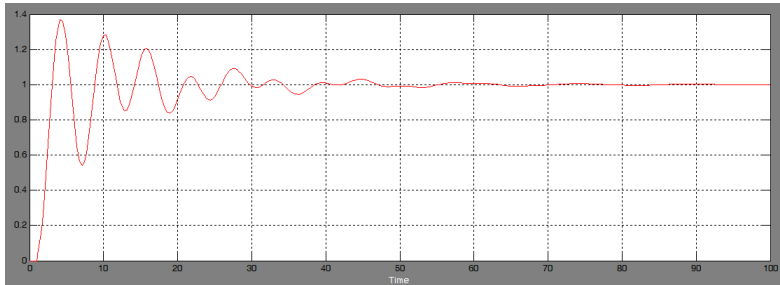
Sea-state 6 – Ketinggian 4 – 6 m

$$h_6(s) = \frac{0.322s}{s^2 + 0.102s + 0.261}$$

**Gambar 4. 17** Hasil Respon *Step* terhadap Rancangan *Lead Compensator* dengan Nilai *Sea State 6***Tabel 4. 9** Karakteristik Respon dengan Gangguan *Sea-state 6*

<i>Peak time (seconds)</i>	9.93
<i>Overshoot (%)</i>	86.08
<i>Settling time (seconds)</i>	46.95

Sea-state 7 – Ketinggian 6 – 9 m



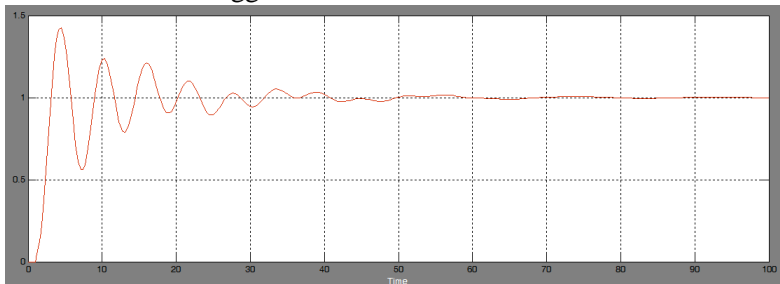
Gambar 4. 18 Hasil Respon *Step* terhadap Rancangan *Lead Compensator* dengan Nilai *Sea State 7*

$$h_7(s) = \frac{0.263s}{s^2 + 0.083s + 0.173}$$

Tabel 4. 10 Karakteristik Respon dengan Gangguan *Sea-state 7*

<i>Peak time (seconds)</i>	4.15
<i>Overshoot (%)</i>	86.29
<i>Settling time (seconds)</i>	48.25

Sea-state 8 – Ketinggian 9 – 14 m



Gambar 4. 19 Hasil Respon *Step* terhadap Rancangan *Lead Compensator* dengan Nilai *Sea State 8*

$$h_8(s) = \frac{0.211s}{s^2 + 0.066s + 0.111}$$

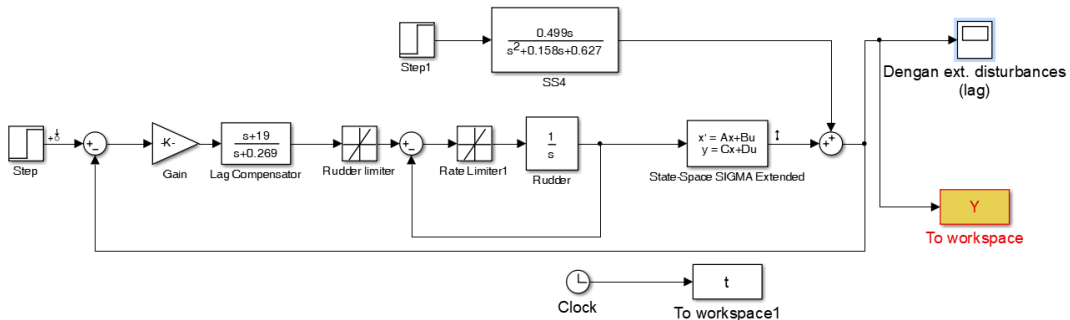
Tabel 4. 11 Karakteristik Respon dengan Gangguan *Sea-state 8*

<i>Peak time (seconds)</i>	4.47
<i>Overshoot (%)</i>	85.75
<i>Settling time (seconds)</i>	52.40

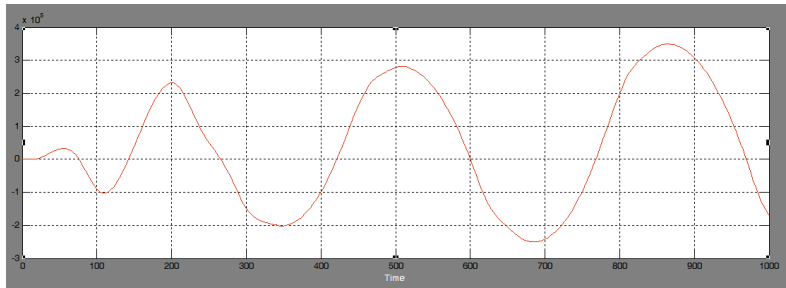
Dari pengujian kompensator *lead* dengan *disturbance* dari *sea-state* 4-8 terlihat bahwa kompensator yang dibuat mampu menghasilkan kondisi sistem yang menuju stabil dengan waktu yang bervariasi.

4.2.2 Lag Compensator

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan *lag compensator*. Dari uji desain *lag compensator* pada sistem kapal perang kelas SIGMA *Extended* tanpa *disturbances*, tidak ditemukan letak kedudukan akar-akar yang cocok terhadap sistem yang digunakan. Namun disini akan dicoba untuk memasukkan ke dalam blok simulink untuk melihat respon keseluruhan dengan *rudder* dan *disturbances*. Susunan diagram blok dapat dilihat pada 4.20 dimana terdapat perubahan tipe kompensator.

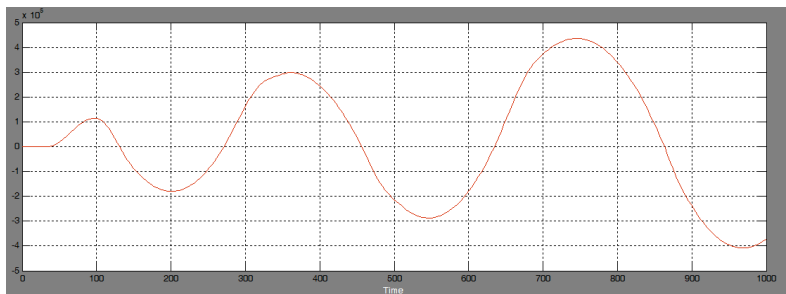


Gambar 4. 20 Tampilan Rancangan *Lag Compensator* dengan *External Disturbances*



Gambar 4. 21 Hasil Respon *Step* terhadap Rancangan *Lag Compensator* dengan Nilai *Sea State* 4 Uji Pertama

Hasil pengujian dengan *lag compensator*, sesuai dengan uji tanpa *disturbance* ; menghasilkan keluaran respon yang tidak stabil untuk tiap *sea-state level* yang diberikan. Disini akan kembali dicoba untuk mengetahui apakah akan terjadi perbedaan dengan pemberian *sea-state* yang jauh lebih tinggi yakni *sea-state* 8 (ketinggian 9 – 14 m).

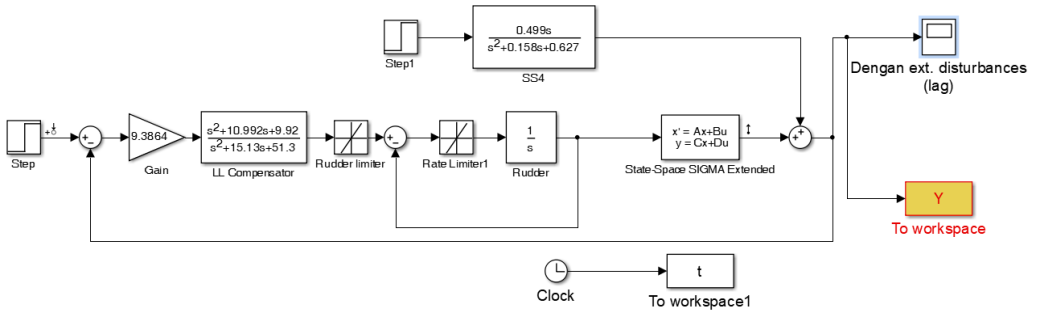


Gambar 4. 22 Hasil Respon *Step* terhadap Rancangan *Lag Compensator* dengan Nilai *Sea State* 4 Uji Kedua

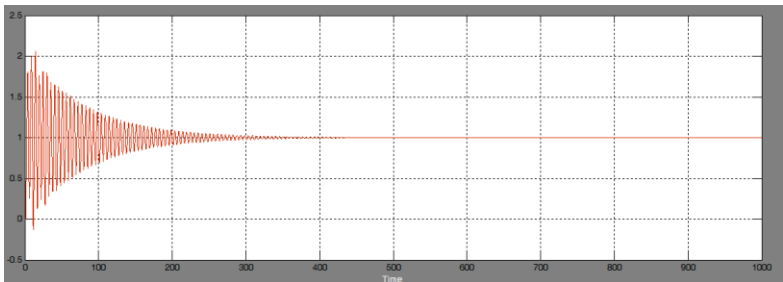
4.2.3 Lead – Lag Compensator

Selanjutnya dilakukan pengujian respon dengan menggunakan desain *lead-lag compensator* dimana menggabungkan kedua sifat dari *lead* dan *lag* kompensator.

$$9.3864 \times \frac{(s + 0.992)(s + 10)}{(s + 10)(s + 5.13)}$$

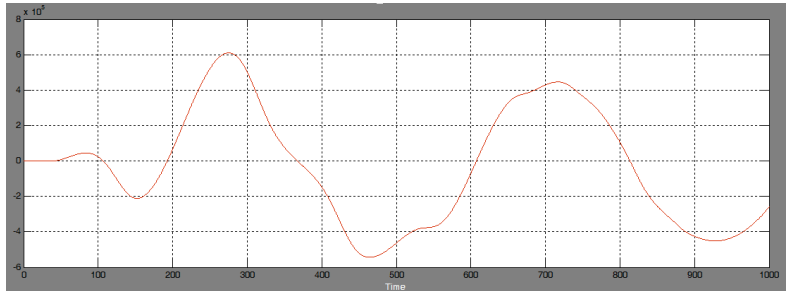


Gambar 4. 23 Tampilan rancangan lead-lag compensator dengan external disturbances



Gambar 4. 24 Hasil Respon *Step* terhadap Rancangan *Lead-Lag Compensator* dengan Nilai *Sea State 4*

Berikut adalah pengujian dengan *sea-state 8* (ketinggian 9 – 14 m) :



Gambar 4. 25 Hasil Respon *Step* terhadap *Rancangan Lead-Lag Compensator* dengan Nilai *Sea State* 8

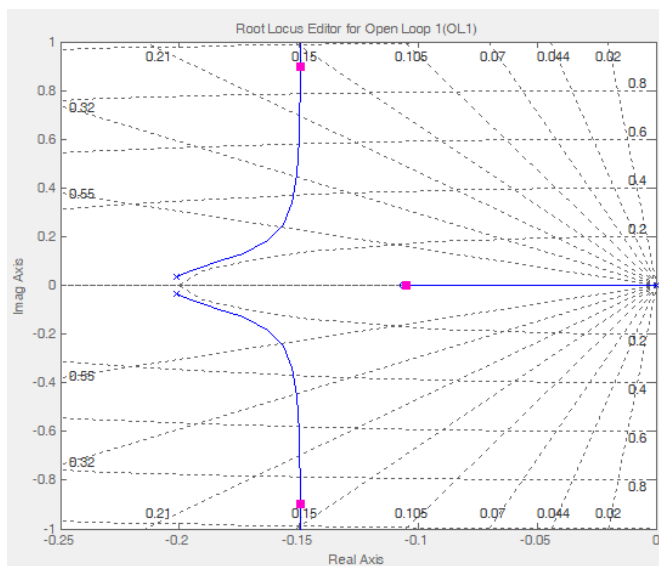
Dari hasil *lead-lag compensator* tetap tidak ditemukan kestabilan hingga akhir respon. Penjelasan keseluruhan akan dibuat pada bagian pembahasan.

4.3 Penerapan Kompensator pada Kondisi *Existing* PID

Penambahan kompensator pada pengendali yang sudah ada (kondisi *existing*) PID dapat dilakukan dengan merancang terlebih dahulu blok pengendali PID untuk mengetahui hasil kinerja PID sendiri, serta setelah diberikan penambahan kompensator.

4.3.1 Kondisi *PID Existing*

Untuk melihat bagaimana sebuah pengendali meletakkan *pole* dan *zero* pada sistem kapal perang kelas *SIGMA Extended* yang sudah dibuat, disini kembali digunakan *transfer function* dari bentuk Nomoto yang telah dibuat, namun dengan peletakan *pole* dan *zero* menggunakan pengendali PID. Berikut tampilan *root-locus* sebelum diberikan PID :



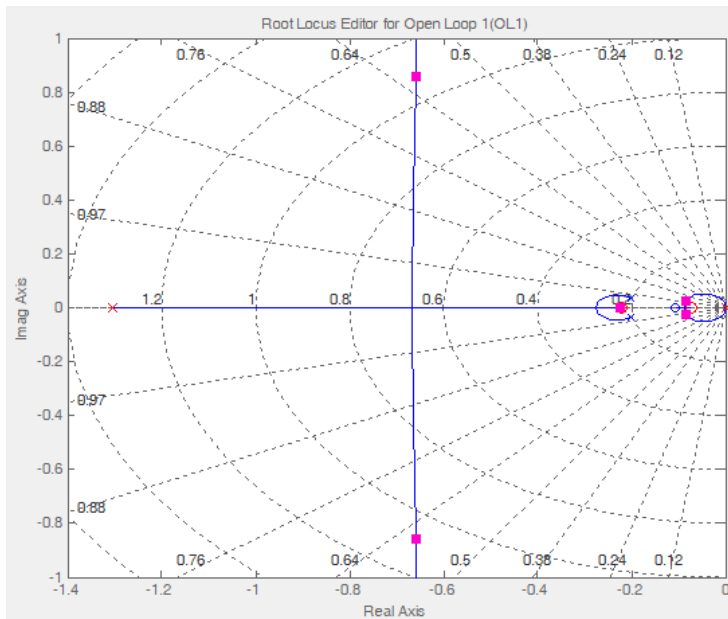
Gambar 4. 26 Root-locus Sebelum Pemberian Pengendali PID

Dengan pemberian pengendali PID melalui metode *auto-tune* dapat terlihat bahwa tiap PID selalu memberikan dua titik *zero*, 1 titik *pole* dan 1 *integrator*. Berikut merupakan peletakan kedudukan akar-akar yang dibuat oleh pengendali PID :

Tabel 4. 12 Kedudukan Akar-akar pada Pengendali PID

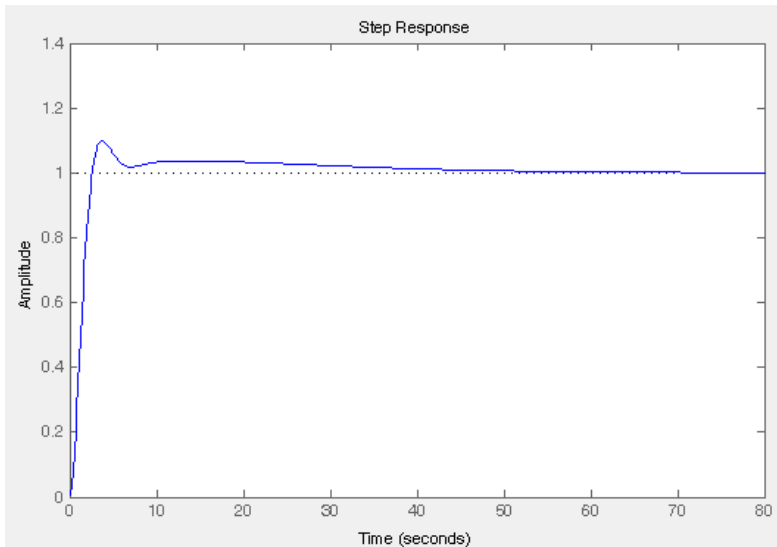
<i>Real zero</i>	-0.22063
<i>Real zero</i>	-0.072341
<i>Integrator</i>	0
<i>Real pole</i>	-1.3055

$$1.4175 \times \frac{(s + 0.221)(s + 0.0723)}{s(s + 1.31)}$$



Gambar 4. 27 Root-locus Sesudah Pemberian Pengendali PID

Setelah mengetahui bagaimana pengendali PID memberikan *pole* dan *zero*, dilanjutkan dengan memperhatikan hasil pada plot *step* yang ternyata tetap bisa mendapatkan hasil kestabilan dengan *settling time* 31.9 detik, *overshoot* 9.78% pada 3.78 detik.

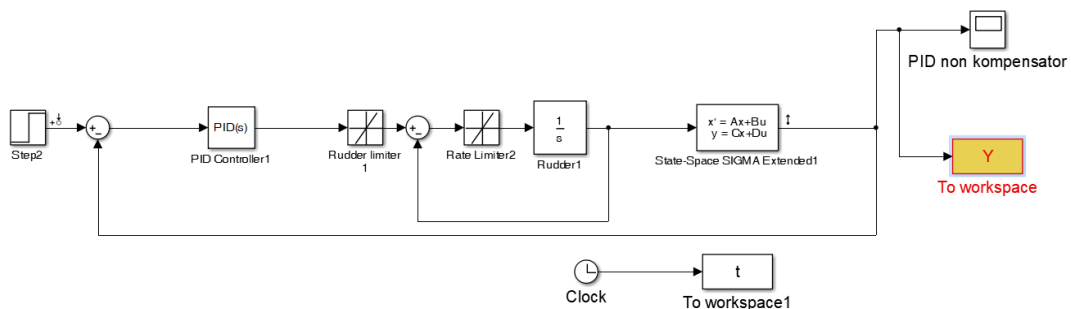


Gambar 4. 28 Hasil Respon *Step* pada PID Menggunakan SISOTOOL

Dengan didapatkan hasil *step* di atas dapat terlihat bahwa PID sendiri juga mampu mendapatkan respon kestabilan yang baik tanpa kompensator dengan 2 *zero*, 1 *pole* dan 1 *integrator*. Namun dibuat kondisi yang berbeda pada sub-bab 4.3.2.

4.3.2 Penggunaan Kompensator dengan Pengendali PID

Dari sub-bab 4.3.1 terlihat bahwa PID sendiri mampu mencapai kestabilan dengan 2 *zero*, 1 *pole* dan 1 *integrator*. Namun disini dibuat keadaan dimana peletakan semua titik pada PID belum mampu mencapai kestabilan, dimana disini dibutuhkan kompensator tambahan untuk meletakkan *pole* dan *zero* selain dari pengendali PID. Berikut merupakan blok pada SIMULINK untuk pengendali PID tanpa kompensator :

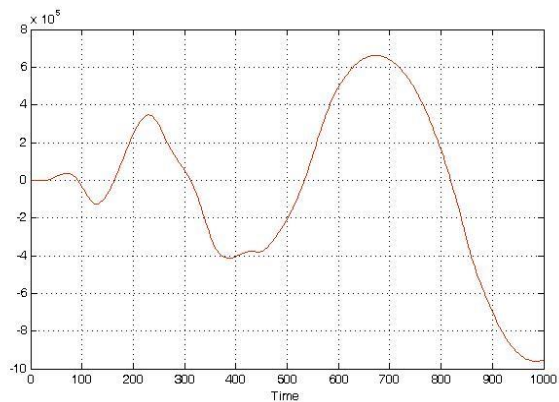


Gambar 4. 29 Uji PID Tanpa Kompensator

Tabel 4. 13 Parameter K_p , T_i , T_d , serta N pada MATLAB

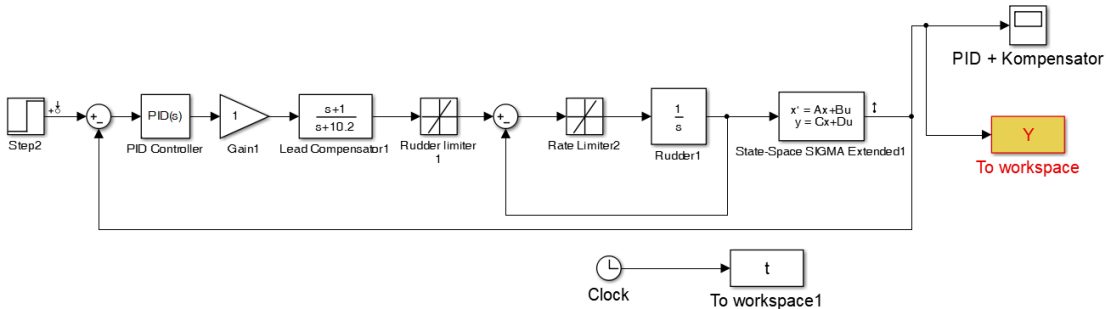
Proportional (P)	1.4802
Integral (I)	0.0040
Derivative (D)	1.4961
Filter coefficient (N)	1.1530

Hasil *step* dengan penggunaan parameter K_p , T_i , dan T_d di atas menghasilkan respon *step* sebagai berikut:



Gambar 4. 30 Hasil Respon *Step* Uji PID Kondisi 2

Terlihat bahwa pada parameter K_p , T_i , T_d yang digunakan masih belum sesuai untuk mencapai kestabilan sistem ; sehingga disini berusaha menambahkan kembali *pole* dan *zero* dengan *lead compensator*. Berikut merupakan tampilan penambahan kompensator pada SIMULINK :

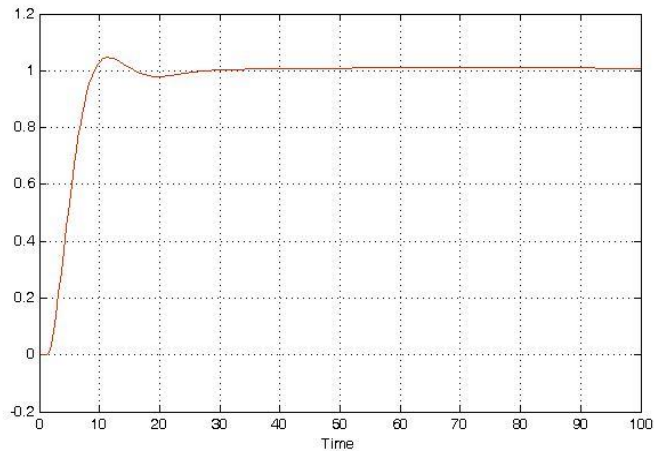


Gambar 4. 31 Uji PID dengan Penambahan Kompensator

Kompensator awal yang digunakan dibuat dengan aturan *lead* pada titik *pole* di -10.2 dan *zero* di -1. Hasil perubahan *gain* di depan bisa mempercepat respon, namun dengan konsekuensi *overshoot* yang meningkat. Sehingga disini akan digunakan *gain* 1 dengan bentuk *transfer function* :

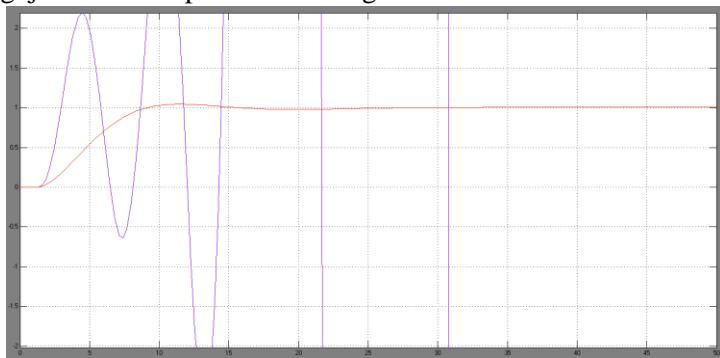
$$1 \times \frac{(s + 1)}{(s + 10.2)}$$

Hasil *step* penambahan kompensator pada pengendali PID didapatkan :



Gambar 4. 32 Hasil Respon *Step* Uji PID dengan Kompensator Kondisi 2

Terlihat bahwa hasil *step* didaatkan menuju kestabilan dengan penambahan kompensator. Hal ini menunjukkan bahwa apabila pengendali PID sendiri tidak mampu membuat sistem stabil ; maka penambahan *pole* dan *zero* tambahan dapat dilakukan dengan kompensator. Perbandingan respon antara dua pengujian diatas dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 4. 33 Perbandingan Sebelum dan Sesudah Diberikan Tambahan Kompensator pada Sistem Kondisi *Existing*

Secara teknologi, kompensator memiliki keunggulan dalam pemasangan di tiap sistemnya ; dimana dalam memperbaiki respon hanya membutuhkan penambahan rangkaian elektronika dengan susunan resistor dan kapasitor tertentu dibandingkan harus mengganti sistem kontrol keseluruhan.

4.4 Pembahasan

Hasil uji coba berbagai desain kompensator telah menghasilkan keluaran respon yang berbeda-beda. Berbagai rancangan dapat dibuat dengan mengubah letak kedudukan akar-akar, nilai *gain* dan juga menyesuaikan *margin phase*.

Pada sistem tanpa *external disturbances* di *lead compensator*, pergeseran *pole* pada titik awal -10 menuju -10.2 dapat menghasilkan karakteristik respon yang sesuai dengan *design requirement* ; dimana hal ini sesuai dengan sifat dari *lead compensator* yang dapat memperbaiki respon transien secara keseluruhan pada sistem. Sistem awal tanpa *disturbance* dapat diperbaiki secara keseluruhan dari *rise time* 1.19 menjadi 0.895, *overshoot* yang dapat diperbaiki dari 17.9 % menuju 17.2% serta karakteristik yang paling penting yakni *settling time* dari 7.9 detik menjadi 4.21 detik. Pergeseran *pole* yang tepat menjauhi garis imajiner akan memperbaiki respon transien menjadi lebih baik.

Percobaan dimana desain *lead compensator* yang telah dibuat untuk diujikan dengan pemasangan *rate limiter* pada *rudder* dan pemberian *disturbance* berupa gelombang laut dengan variasi *sea-state* 4 hingga 8 menghasilkan *settling time* yakni 37.21 detik pada *sea-state* 4 hingga 52.40 detik pada *sea-state* 8. Hal ini dapat dikategorikan respon yang cukup baik, terlebih bila dibandingkan dengan beberapa jurnal yang menggunakan kapal SIGMA non-extended dengan *fuzzy logic* yang menghasilkan 53 detik di *sea-state* 4. Dari hasil juga dapat dikatakan bahwa sistem cocok menggunakan kompensator *lead* dengan pembuatan metode *root locus*. Namun dari *overshoot* yang dihasilkan oleh kompensator

yang dibuat, masih diperlukannya desain kompensator lain dengan metode yang jauh lebih baik untuk menghasilkan *overshoot* lebih kecil.

Selanjutnya pada pembuatan *lag compensator*, baik pada keadaan sebelum diberikan *disturbances* ataupun sesudahnya ; sistem tidak dapat mencapai kestabilan dengan berbagai variasi peletakan *pole* ataupun *zero*. Fungsi dari *lag compensator* sendiri adalah untuk menghilangkan *error* pada sistem dengan besar sesuai rentang perbandingan antara $\frac{z}{p}$. Dari berbagai variasi dan perbandingan antara *zero* dengan *pole* tidak mampu mencapai kestabilan, dimana menandakan bahwa sistem tidak cocok menggunakan *lag compensator*.

Dengan menggunakan *lead-lag compensator* pada beberapa uji terakhir, terlihat bahwa sistem tetap tidak stabil dengan adanya susunan *pole* dan *zero* yang membentuk *lag compensator* . Sistem tidak dapat diperbaiki hasil respon terutama pada *error* dengan menggunakan *lag compensator*. Sehingga pada *lead-lag compensator*, respon transien yang sudah diperbaiki pada *lead* tidak terlihat dikarenakan sistem tidak stabil.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari hasil pembuatan tugas akhir ini antara lain :

- a. Hasil perancangan ketiga jenis desain kompensator pada kapal perang kelas SIGMA Extended, memberikan hasil bahwa desain kompensator yang mampu mempertahankan kestabilan saat diberikan *external disturbances* adalah pada *lead compensator*.
- b. Pembuatan desain *lead compensator* dengan *pole* dan *zero* yang masing-masing titiknya diletakkan pada -10.2, -1 dan nilai *gain* 14.77 ; mampu menghasilkan respon yang menuju titik kestabilan dengan berbagai variasi waktu di tiap ketinggian gelombang hingga lebih dari *sea state* 6. *Lead compensator* menghasilkan settling time 37.21 pada *sea-state* 4, 40.97 pada *sea-state* 5, 46.95 pada *sea-state* 6, 48.25 pada *sea-state* 7, hingga 52.40 pada *sea-state* 8.
- c. Dari hasil analisis kompensator terlihat bahwa sistem yang diberikan aturan *lag* di kedudukan akar-akarnya menghasilkan respon yang tidak stabil saat diberikan gangguan, baik pada *lag* sendiri ataupun *lead-lag*. Hal ini disebabkan tidak cocoknya sistem menggunakan aturan *lag* pada peletakan *pole* dan *zero* untuk memperbaiki *error*.
- d. Hasil rancangan desain kompensator yang dibuat dapat ditambahkan pada sistem kondisi *existing* yakni PID *controller*. Desain kompensator dapat ditambahkan bila suatu sistem membutuhkan *pole* dan *zero* tambahan untuk mencapai kestabilan.

5.2 Saran

Adapun saran dalam pembuatan tugas akhir ini antara lain diperlukannya pembuatan desain kompensator yang dapat menghasilkan respon yang jauh lebih baik pada sistem kapal perang kelas SIGMA *Extended* dibandingkan dengan pembuatan desain kompensator secara manual yakni peletakan kedudukan akar-akar. Tentunya dengan menggunakan metode pengendalian lainnya dan dapat dibandingkan hasilnya dengan pembuatan pengendali secara manual.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisjah, A. S. (n.d.). Sistem Pengendalian Otomatis - Diagram Nyquist. Share ITS.
- Artilleri. (2014). *Mengenal 4 Korvet Kelas SIGMA TNI AL. Dikutip dari.* (Artilleri) Retrieved Desember 20, 2016, from <http://www.artilleri.org/2014/03/4-korvet-kelas-SIGMA-tni-al.html>
- Cruz, J. D. (2005). *Automation for the Maritime Industries.*
- D Clarke, P. G. (1983). The Application of Manoeuvring Criteria In Hull Design Using Linear Theory. *Naval Architect.*
- Dr Tristan Perez, T. I. (2007, September 18). Modelling and Simulation of Environmental Disturbances. *Environmental Disturbance.*
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles.* John Wiley & Sons.
- Fossen, T. I. (2002). *Marine Control System.* Marine Cybernetics.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control.* John Wiley & Sons.
- KBismarck. (2004). *Hull Coefficient.* Retrieved from KBismarck, Naval History Forums.
- Kementrian Perhubungan RI. (2009). *Laporan Analisis Trend Kecelakaan Laut 2003-2008.* PT. Trans Asia Consultants.
- Kurniawan, M. A. (2014). *Analisa Data Gelombang Acak untuk Pemetaan LongTerm Sea State dan Modifikasi Parameter Spektrum dengan Fourier Transform pada Perairan Indonesia.* Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Sistem Perkapalan ITS.
- Ogata, K. (2002). *Modern Control Engineering 4th Edition.* Prentice Hall.
- Raghupati Goswami, S. S. (2012). Design of Compensator for a Hydrofoil Ship. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering.*

- Rahajoeningroem, T. (2010). Metode Respons Frekuensi. Teknik Elektro UNIKOM.
- ResearchGate. (2013, November 13). *What is the difference between a compensator and a controller?* Retrieved Februari 21, 2017, from https://www.researchgate.net/post/What_is_the_difference_between_a_compensator_and_a_controller
- Roll-Royce. (n.d.). *Rudders - Stabilisation & Manoeuvring*. Retrieved from Rolls-Royce Rudders: <http://www.rolls-royce.com/products-and-services/marine/product-finder/stabilisation-and-manoeuving/rudders.aspx>
- Surya, D. A. (2011). *Perancangan Kontroler Pi Anti-Windup Berbasis Mikrokontroler Atmega 32 pada Kontrol Kecepatan Motor DC*. Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro.
- Triwiyatno, A. (2012). In *Perancangan Sistem Kontrol dengan Tanggapan Waktu*. Universitas Diponegoro.
- World, M. (n.d.). *Apa Yang Di Maksud Dengan GRT-NRT-TPC-FWA-DWA-LOA-LBP*. (Maritime World) Retrieved Desember 20, 2016, from <http://www.maritimeworld.web.id/2013/07/Apa-Yang-Di-MaksudDengan-GRT-NRT-TPC-FWA-DWA-LOA-LBP.html>
- WU Kai-ta, Y. B.-h. (2011). Research on the Performance of Passive Heave. *Shanghai Jiaotong University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.

LAMPIRAN

Lampiran A. Spesifikasi Kapal SIGMA Extended dan variabel non-dimensional

Adapun spesifikasi dari Kapal Perang kelas SIGMA Extended yang digunakan dalam sistem rancangan adalah:

LBP	Panjang kapal	106 m
U	Kecepatan	27.9 knot / 14.4 m/s
B	Lebar	14 m
T	Sarat	3.7 m
C_B	Koef. Blok	0.44
x_g	<i>Specific Gravity</i>	2.22
A_δ	Luasan <i>rudder</i>	3.856 m ²
m	<i>Displacement</i>	2423 ton
X_G	<i>Specific Gravity non-dimensional</i>	0
R	Jari-jari girasi	21.1 m
m'	Massa non-dimensional	0.0040126

Dari spesifikasi kapal yang didapatkan, diambil beberapa data untuk dimasukkan ke dalam persamaan Clarke dengan tujuan untuk mendapatkan variabel non-dimensional. Persamaan untuk mendapatkan variabel non dimensional adalah:

$$\frac{-Y_v'}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16 + \frac{C_B B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^2$$

$$\frac{-Y_v'}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.4 \frac{C_B B}{T}$$

$$\frac{-Y_{\dot{r}}'}{\pi(T/L)^2} = 0.67 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.0033 \left(\frac{B}{T}\right)^2$$

$$\frac{-Y_r'}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2\left(\frac{B}{L}\right) - 0.08\left(\frac{B}{T}\right)$$

$$\frac{-N_v'}{\pi(T/L)^2} = 1.1\left(\frac{B}{L}\right) - 0.041\left(\frac{B}{T}\right)$$

$$\frac{-N_v'}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.4\left(\frac{T}{L}\right)$$

$$\frac{-N_{\dot{r}}'}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.017\frac{C_B B}{T} - 0.33\left(\frac{B}{L}\right)$$

$$\frac{-N_r'}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0.039 + \frac{B}{T} - 0.56\left(\frac{B}{L}\right)$$

Lampiran B. Keseluruhan data non-dimensional

$-Y_v'$	0.004504542	Y_v'	-0.0045
$-Y_v'$	0.006373563	Y_v'	-0.00637
$-Y_{\dot{r}}'$	0.000157793	$Y_{\dot{r}}'$	-0.00016
$-Y_r'$	-0.001959328	Y_r'	0.001959
$-N_v'$	-3.76921E-05	N_v'	3.77E-05
$-N_v'$	0.002233396	N_v'	-0.00223
$-N_{\dot{r}}'$	0.000260349	$N_{\dot{r}}'$	-0.00026
$-N_r'$	0.001238047	N_r'	-0.00124
Iz'	0.000162265	m'	0.004013
Ir'	0.000160505	XG	0
N_θ	-0.00395743	B	14
Y_θ	0.007914859	L	106
U	14.4	T	3.7
xg	2.22	CB	0.44

Lampiran C. Bentuk matriks M N non-dimensional

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_o - Y_r \\ -N_v & I_z - N_r \end{bmatrix}$$

Matriks M'	
0.008517142	0.000158
-3.76921E-05	0.00032
Det M'	
2.73192E-06	
Matriks N'	
0.006373563	-0.00196
0.002233396	0.129513
Det N'	
0.000829834	

Lampiran D. Hasil normalisasi menjadi M N dimensional dan bentuk akhir *transfer function*

Dari matriks M' dan N' yang berbentuk non-dimensional, dilanjutkan dengan proses normalisasi sesuai dengan *Prime System* dari SNAME (1950). Perhitungan koefisien hidrodinamika dilakukan pada suatu prototype dalam bentuk kapal yang tidak sesuai dengan ukuran aslinya. Sehingga dengan normalisasi ; persamaan dapat digunakan pada ukuran kapal aslinya.

Matriks M	
0.004353863	0.008550138
-1.92678E-05	0.017342622
Det M	
7.56721E-05	
Matriks N	
0.000442609	-0.01442283
0.000155097	0.215854739
Det N	
9.77761E-05	

Dari matriks M N hasil normalisasi, diambil determinan M untuk nantinya menghitung nilai b_1 dan b_2 beserta dengan data yang didapat diawal dengan rumus :

$$b_1 = \frac{(I_z - N_{\dot{r}})Y_{\delta} - (mx_G - Y_{\dot{r}})N_{\delta}}{\det(M)}$$

$$b_2 = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_{\delta} - (mx_G - N_{\dot{v}})Y_{\delta}}{\det(M)}$$

Hasil b_1 dan b_2 yang didapatkan selanjutnya dimasukkan dalam perhitungan K_R , $K_R T_3$, $T_1 T_2$, serta $T_1 + T_2$ sebelum akhirnya dimasukkan ke dalam bentuk akhir persamaan Nomoto.

$$K_R = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)}$$

$$K_R T_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det(N)}$$

$$T_1 T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)}$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)}$$

T1.T2
24.02121122
T1+T2
9.673878977
KR
2.081674455
KR.T3
19.64824437

Dimana hasil yang didapatkan disubstitusi ke dalam bentuk akhir menjadi :

$$\frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} = \frac{K_R(1 + T_3s)}{s(1 + T_1s)(1 + T_2s)} = \frac{K_R + K_RT_3s}{T_1T_2s^3 + (T_1 + T_2)s^2 + s}$$

$$\frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} = \frac{19.64824s + 2.081674455}{24.02121122s^3 + 9.673879s^2 + s}$$

Lampiran E. Script desain kompensator pada SISOTOOL

```
num = [19.64824437 2.081674455];
den = [24.02121122 9.673878977 1 0];
G=tf(num,den) % Transfer Function Sigma Extended
sisotool(G) % buka sisotool
p=pole(G) % list pole tf
z=zero(G) % list zero tf
```

Lampiran F. Tampilan rancangan kompensator pada SIMULINK

